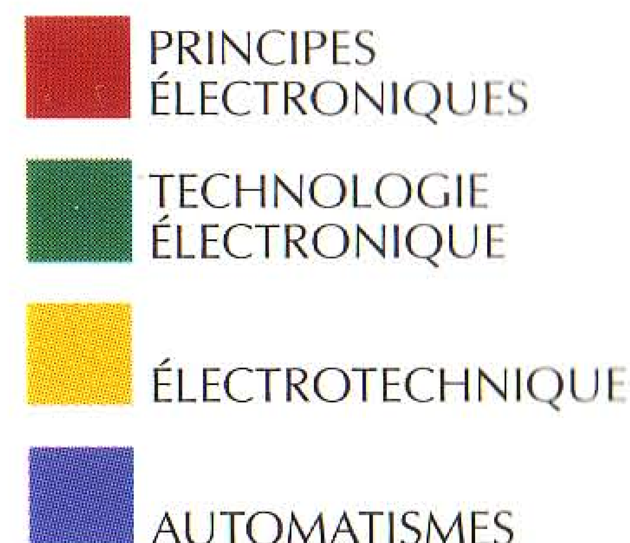
Collection EEA
Série Principes électroniques



Pierre Mayé

L'ÉLECTRONIQUE PAR L'EXPÉRIENCE

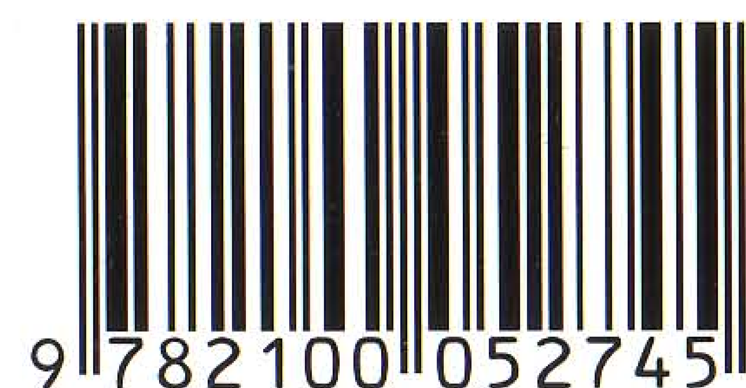
Pour aborder l'électronique, il est nécessaire, au-delà de la théorie, d'acquérir un sens physique – pour ne pas dire pratique – des phénomènes inhérents à cette discipline.

C'est ce que propose *L'électronique par l'expérience* en délivrant les moyens de comprendre et d'assimiler les modes de raisonnements de l'électronique. La démarche adoptée consiste en l'expérimentation de petits montages simples décrits avec la rigueur et la clarté qui s'imposent, et choisis pour leur grande force illustrative des notions à maîtriser.

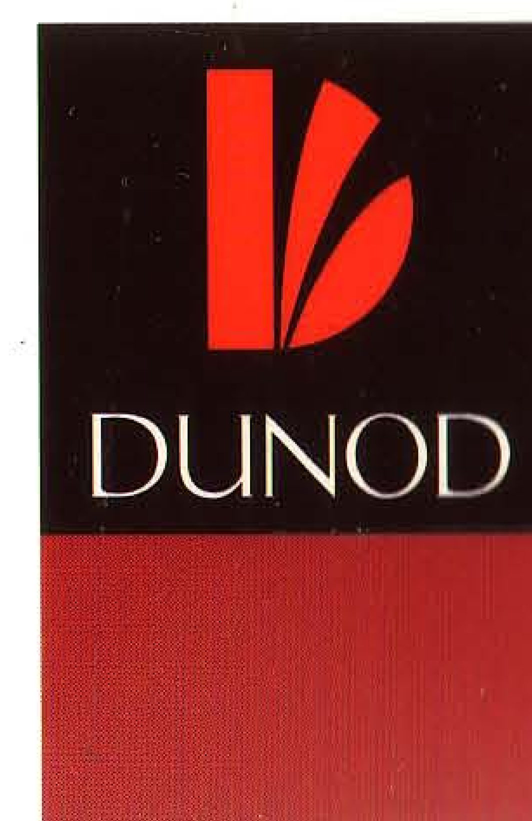
Cet ouvrage, véritable guide d'apprentissage de l'électronique, s'adresse à l'électronicien débutant ainsi qu'à toute personne qui dans son travail est amené un jour à se « familiariser » avec l'électronique.

PIERRE MAYÉ

Ingénieur en électronique et en électromécanique, et agrégé de physique, il enseigne à l'École des hautes études industrielles (HEI) à Lille ainsi qu'en BTS d'électronique à Arras. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages spécialisés en électronique et en électrotechnique dont *Moteurs électriques pour la robotique* publié chez Dunod.



ISBN 2 10 005274 8
Code 045274



http://www.dunod.com

P. MAYÉ

L'ÉLECTRONIQUE PAR L'EXPÉRIENCE





VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Dans la série PRINCIPES ÉLECTRONIQUES

René Besson, *Aide-mémoire d'électronique pratique*

Roger Bourgeron, *2 000 schémas et circuits électroniques*

Pierre Cabanis, *Électronique digitale*

Alain Charoy, *Parasites et perturbations des électroniques (4 volumes)*

François de Dieuleveult,
- *Principes et applications de l'électronique (2 vol.)*
- *Électronique appliquée aux hautes fréquences*

Gérard Félétou,
- *Équivalences circuits intégrés*
- *Équivalences diodes et diodes Zener*
- *Équivalences transistors (2 volumes)*
- *Équivalences thyristors, triacs et opto*

J.-M. Fouchet / A. Perez-Mas, *Électronique pratique*

Robert G. Krieger, *Calculer ses circuits*

Henri Lilen, *Opto-électronique*

Herrmann Schreiber,
- *Guide mondial des semi-conducteurs*
- *300 schémas d'alimentation*
- *350 schémas HF de10 kHz à 1 GHz*
- *400 schémas audio, Hi-Fi, sono et BF*
- *400 nouveaux schémas radiofréquences*

Christian Tavernier, *Guide pratique de la CEM*

Principes électroniques

Pierre Mayé

L'électronique par l'expérience

2e édition

DUNOD

Ce pictogramme mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du **photocopillage**.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (**CFC**, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2000

© Fréquences, Paris, 1989 pour la 1re édition
sous le titre *Comprendre l'électronique par l'expérience*

ISBN 2 10 005274 8

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. • Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

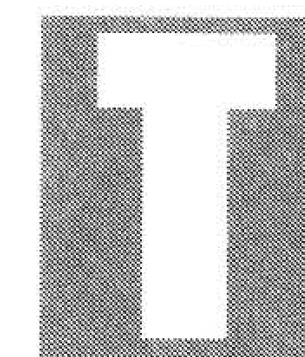


TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 1

CHAPITRE 1 - MONTAGES ET COMPOSANTS 3

1.1 Câblage sans soudure 3
1.2 Lecture des schémas 5
Symboles graphiques pour les schémas . . . 5
Masses et alimentations 5
1.3 Résistances 9
Valeurs normalisées 10
Marquage des résistances 11
Puissance maximale 12
Technologie 13
Résistances variables 13
Associations de résistances 13
1.4 Condensateurs 16
Valeurs normalisées 17
Marquage des condensateurs 18
Tension maximale 19
Technologie 19
1.5 Transformateurs 20
1.6 Diodes 22
Diodes Zener 24

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

1.7 Transistors 25
1.8 Circuits intégrés 27

CHAPITRE 2 - APPAREILS DE MESURE. 29

2.1 Multimètre 29
Différents types 29
Caractéristiques 30
Méthodes de mesure 32
2.2 Oscilloscope 33
Oscilloscope analogique 33
Oscilloscope numérique 34
Cartes d'acquisition 35
Branchement de l'appareil 36
Description des commandes 36
Performances 38
Mode d'emploi 38
2.3 Alimentation continue 42
2.4 Générateurs de signaux 43

CHAPITRE 3 - AMPLIFICATEUR DE TENSION
À CIRCUIT INTÉGRÉ. 45

3.1 Description du schéma et choix des composants 45
3.2 Vérification du fonctionnement 49
3.3 Limites d'utilisation 50
Tension maximale 50
Courant maximal 52
Fréquence maximale 53
3.4 Application 54

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

CHAPITRE 4 - AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE
À TRANSISTOR 59

4.1 Description du schéma et choix des composants 59
4.2 Vérification du fonctionnement 62
4.3 Limites d'utilisation 64
Tension minimale 64
Tension maximale 64
Courant maximal 65
4.4 Application 65

CHAPITRE 5 - FILTRE PASSE-BAS 67

5.1 Description du schéma et choix des composants 67
5.2 Vérification du fonctionnement 72
5.3 Limites d'utilisation 73

CHAPITRE 6 - ALIMENTATION CONTINUE. 75

6.1 Description du schéma
et explication du fonctionnement 75
Fusible 75
Interrupteur 76
Transformateur 76
Redressement 77
Filtrage 79
Régulation 79
6.2 Choix des composants 82
Régulateur 82
Transformateur 82
Diodes 83
Condensateur de filtrage 84
Fusible 85

6.3 Vérification du fonctionnement 86

CHAPITRE 7 - COMPARATEUR 87

7.1 Description du schéma et choix des composants 87
7.2 Vérification du fonctionnement 90
7.3 Limites d'utilisation 90
Courant de sortie maximal 90
Fréquence maximale 92
7.4 Application 92

CHAPITRE 8 - GÉNÉRATEUR DE SIGNAUX CARRÉS. 97

8.1 Description du schéma et choix des composants 97
8.2 Vérification du fonctionnement 102
8.3 Limites d'utilisation 102
Courant de sortie maximal 102
Fréquence maximale 102
Rapport cyclique minimal 103
8.4 Application 104

CHAPITRE 9 - OSCILLATEUR SINUSOÏDAL 107

9.1 Description du schéma et choix des composants 107
9.2 Vérification du fonctionnement 110
9.3 Limites d'utilisation 111
Charge 111
Fréquence maximale 112
Distorsion 112

INDEX 113

AVANT-PROPOS

Pour s'initier à l'électronique, il ne suffit pas de lire un livre, aussi complet soit-il. Il faut être soi-même confronté aux problèmes qui apparaissent lors de la réalisation. Mais surtout, pour progresser, il faut comprendre ce que l'on fait et trouver des solutions aux questions qui se posent.
Ce livre essaie de guider le débutant en l'amenant à assimiler les modes de raisonnement de l'électronique au cours de l'expérimentation de petits montages simples.
Au début de l'ouvrage, on trouve quelques notions sur les composants utilisés et sur les appareils nécessaires. Ensuite, divers circuits sont abordés avec une démarche commune : la description du schéma et le choix des composants puis la vérification du fonctionnement et la recherche des limites d'utilisation. Le lecteur est ainsi aidé pas à pas au cours de ses propres expériences.

CHAPITRE 1

MONTAGES ET COMPOSANTS

Devant la diversité des matériels et des composants disponibles, il est nécessaire de voir ceux qui sont réellement utiles pour les expérimentations courantes et ceux qui ne sont nécessaires que dans des applications très spécifiques. Dans ce chapitre, on se propose, après avoir examiné les moyens de réaliser facilement le câblage de petits montages, de faire un tour d'horizon des composants électroniques de base qui composent le minimum pour aborder l'expérimentation de l'essentiel des applications caractéristiques du vaste domaine que constitue l'électronique.

1.1 Câblage sans soudure

Dans les réalisations des montages électroniques, on soude les composants sur un circuit imprimé. Ce mode d'interconnexion permet d'obtenir un résultat de bonne qualité, mais nécessite une série d'opérations : dessin du typon, insolation, développement et gravure pour la fabrication du circuit imprimé, puis pliage et soudure des composants. Ce travail, nécessaire lorsqu'on veut construire un appareil, n'est pas utile quand il s'agit simplement de câbler de petits montages à des fins d'expérimentation. On peut dans ce cas utiliser des supports qui permettent la connexion des composants par enfichage sans soudure. Un tel matériel est photographié à la *figure 1.1*. Les pattes des composants sont simplement maintenues dans de petites pinces métalliques reliées en un certain nombre de rangées autorisant la matérialisation des liaisons nécessaires.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

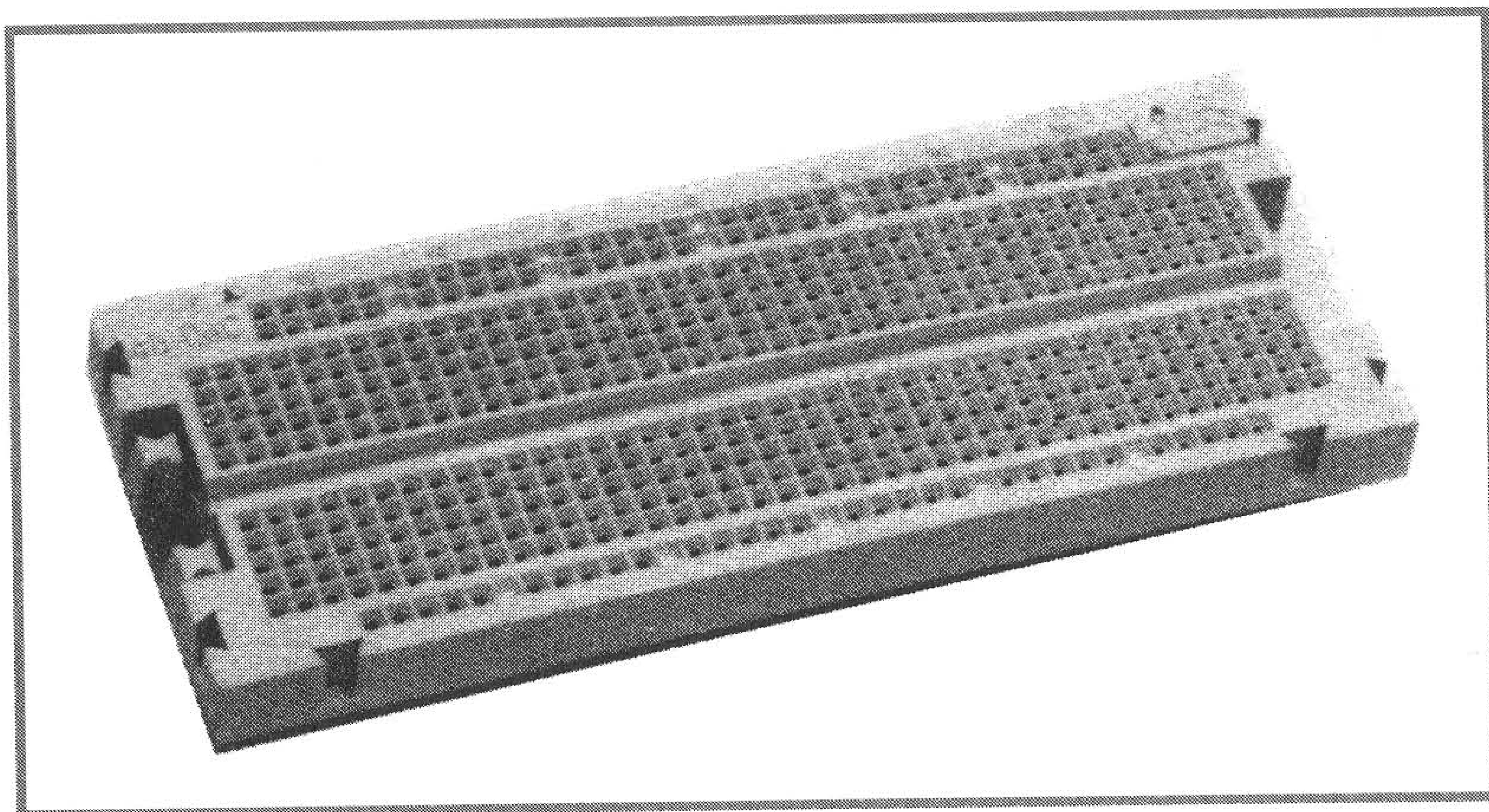


Figure 1.1 – Support pour enfichage des composants (doc. Sieber Scientific).

Tous les composants courants peuvent être ainsi enfichés : résistances, condensateurs, transistors, circuits intégrés... Seuls les éléments ayant des pattes de trop gros diamètre doivent être placés à l'extérieur.

L'intérêt de cette solution est de faciliter la mise au point des montages : on peut modifier la valeur d'un élément, ajouter ou enlever un composant sans aucun problème. Le circuit imprimé ne sera ainsi réalisé que si l'on désire conserver un montage et après que son fonctionnement ait été parfaitement vérifié et ajusté.

De plus, les composants employés avec un câblage sans soudure sont réutilisables alors que la connexion sur un circuit imprimé oblige à couper certaines pattes, ce qui rend difficile un nouvel emploi des éléments.

Enfin, le coût très raisonnable des supports décrits doit être comparé à l'investissement nécessaire à une fabrication correcte des circuits imprimés ou à la dépense correspondant à l'achat régulier de circuits déjà réalisés.

1.2 Lecture des schémas

Symboles graphiques pour les schémas

Les montages électroniques sont décrits par des schémas où apparaissent des représentations conventionnelles pour les différents dispositifs fréquemment rencontrés. Malheureusement, les symboles adoptés ne sont pas partout les mêmes. Les organismes de normalisation ont défini un ensemble cohérent de représentations graphiques, mais les habitudes prises font que d'autres schématisations sont très souvent rencontrées. Pour notre part, nous respecterons les normes en vigueur, mais il est nécessaire de connaître d'autres symboles que l'on risque de trouver dans de nombreuses publications. La *figure 1.2* précise les principales représentations, normalisées ou non, que l'on rencontre sur les schémas des montages électroniques.

Masses et alimentations

En électronique, le mot « masse » recouvre plusieurs notions différentes. C'est tout d'abord, au sens propre, la carcasse métallique de l'appareil. Cette masse est en général reliée à la terre par l'intermédiaire de la prise secteur, mais ce n'est pas systématique et il ne faut pas confondre masse et terre. En deuxième lieu, la masse est la connexion qui assure le « retour » du courant à l'alimentation continue. Si le montage utilise une seule alimentation, c'est souvent le pôle négatif qui est pris comme masse du montage, mais ce n'est pas une obligation et il peut arriver, dans certains cas, que la masse soit le pôle positif. Si le montage utilise deux sources de tension continue de polarités opposées, c'est le point commun aux deux générateurs qui est choisi. Ce point peut être relié à la masse métallique de l'appareil, mais ce n'est pas systématique car la carcasse peut être en plastique ou même ne pas exister comme c'est le cas des montages que nous réaliserons en câblage sur un support à enfichage. Cela n'empêchera pas l'électronicien de continuer à nommer masse le commun des alimentations. Enfin, la masse est une référence des potentiels pour le circuit.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Symbole normalisé	Autre symbole	
		Conducteur
		Croisement de conducteurs sans liaison
		Croisement de conducteurs avec liaison
		Dérivation
		Résistance
		Résistance variable
		Potentiomètre
C		Condensateur
+		Condensateur polarisé (le trait court est le pôle +)

Figure 1.2 – Symboles graphiques pour les schémas électroniques.

Symbole normalisé	Autre symbole	
		Masse
		Pile ou alimentation continue (le grand trait est le pôle +)
		Bobine ou enroulement
		Transformateur
		Diode
		Diode zener
		Transistor NPN
		Transistor PNP
+ ▷ ∞ + -	+ -	Amplificateur opérationnel

Figure 1.2 – Symboles graphiques pour les schémas électroniques (suite).

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

En effet, une tension est une différence de potentiel, ce qui signifie qu'elle ne peut être définie qu'entre deux points du montage. Par commodité, on choisit de fixer l'un de ces points, la masse et donc les différents appareils, générateurs ou dispositif de mesure, seront connectés entre la masse et un autre point du montage. Pour alléger le tracé des schémas, on ne représente pas toujours les liaisons qui doivent exister entre les différents points que l'on désire assembler à la masse. La *figure 1.3* montre ainsi deux manières différentes de représenter le même circuit réel. Quand on est devant un schéma où les liaisons de masse sont omises, il ne faut cependant pas oublier d'effectuer les connexions correspondantes lors du câblage.

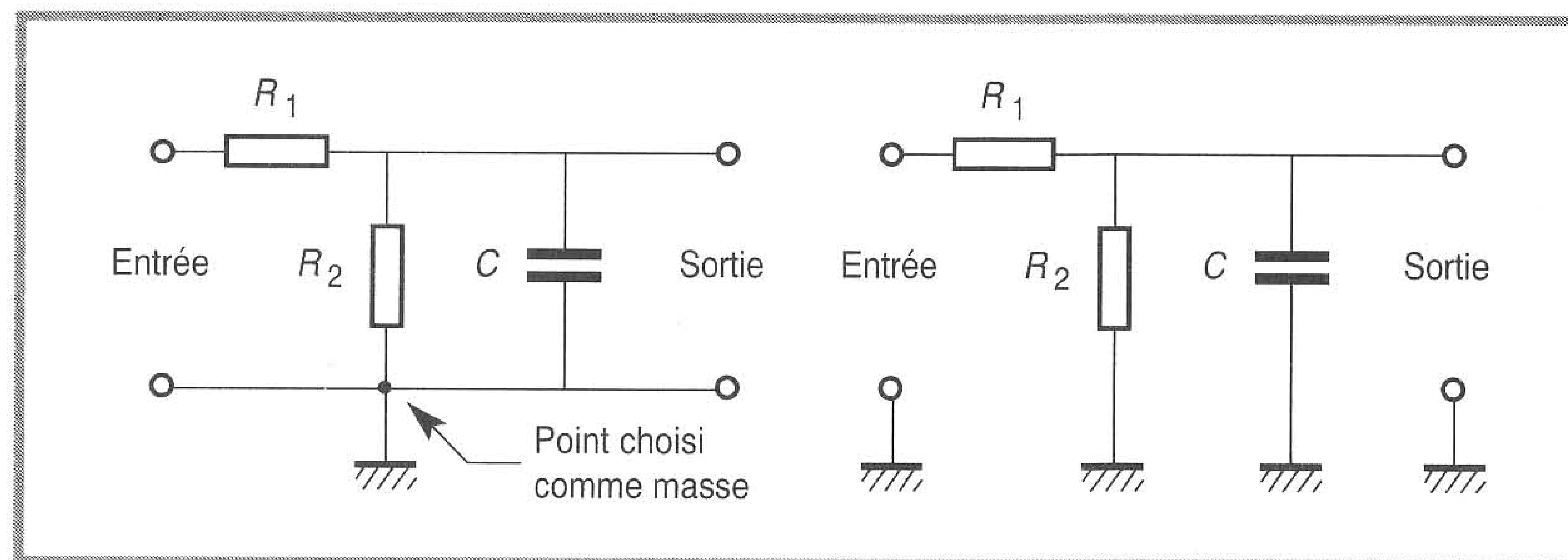


Figure 1.3 – Représentation des liaisons de masse.

Presque tous les circuits électroniques doivent être alimentés, c'est-à-dire qu'il faut leur fournir une certaine énergie sous forme de courant continu. Les générateurs qui réalisent cette alimentation sont souvent omis sur les schémas : les bornes qui doivent leur être reliées sont simplement désignées par le symbole de la tension d'alimentation correspondante. La *figure 1.4* donne un exemple montrant deux façons équivalentes de représenter un montage. Enfin, quand on utilise des circuits intégrés, il est fréquent de ne pas indiquer du tout les connexions d'alimentation. Il s'agit là uniquement d'une convention de représentation et il va de soi que ces liaisons sont indispensables.

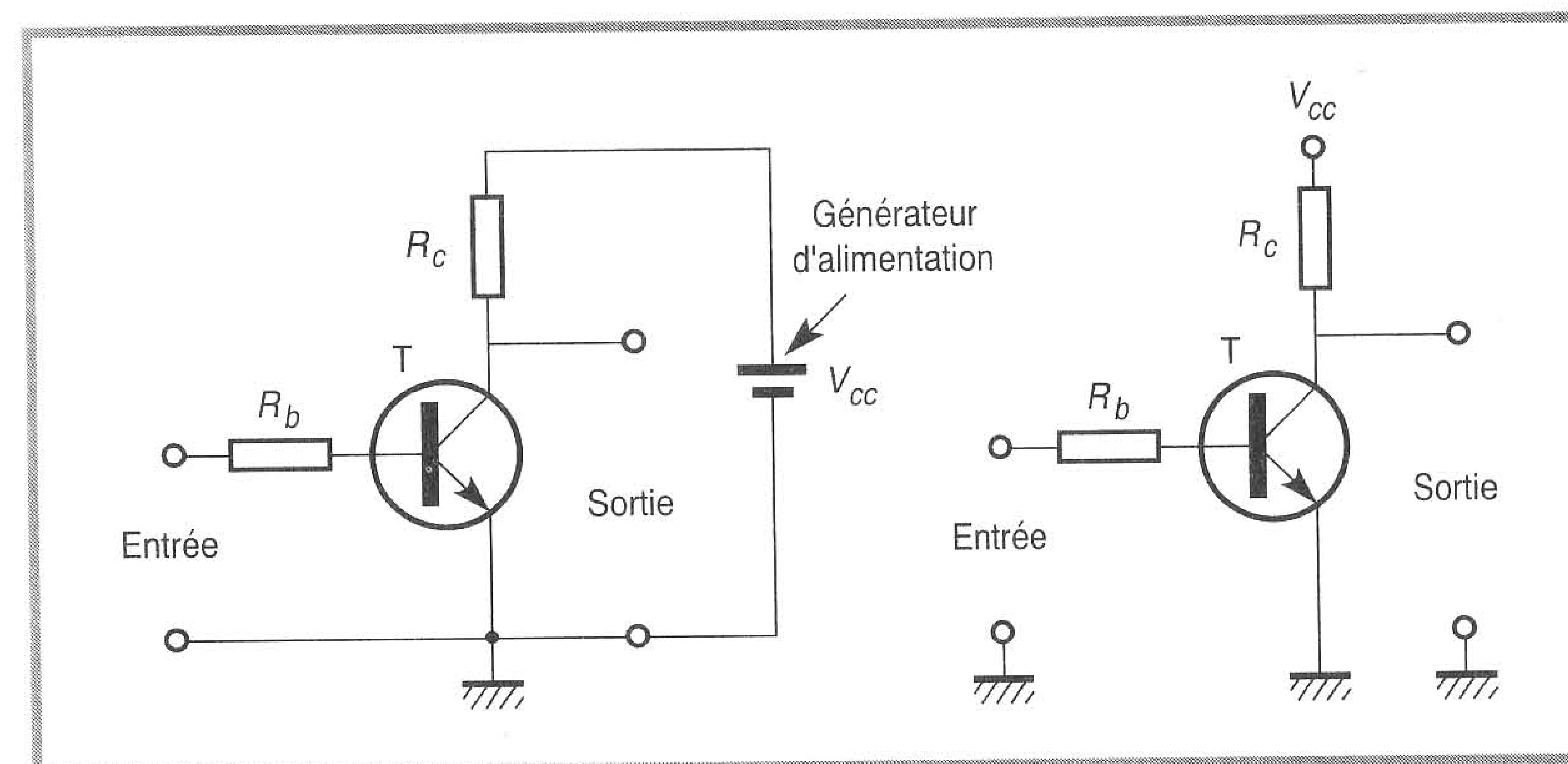


Figure 1.4 – Représentation de l'alimentation d'un montage.

1.3 Résistances

La résistance est à la fois le composant le plus simple et le plus répandu en électronique. C'est un dipôle (élément à deux bornes) qui répond à la loi d'Ohm :

$$U = RI$$

La tension U à ses bornes est proportionnelle au courant I qui le traverse. Le coefficient R est la résistance du dipôle et s'exprime en ohms (symbole Ω). Cette unité est relativement petite en électronique et on utilise beaucoup ses multiples : le kilo-ohm (symbole : kΩ) qui vaut 1 000 Ω et le mégohm (symbole MΩ) qui correspond à 1 000 kΩ (un million d'ohms). Dans le langage courant, on confond l'élément et le nombre R qui le caractérise en leur donnant à tous deux le nom de résistance.

Une résistance consomme une certaine énergie électrique et la transforme en chaleur : c'est l'effet Joule. Si cette propriété peut être utile dans certains domaines (radiateurs électriques par exemple), c'est un inconvénient pour l'électronicien : d'une part la puissance électrique

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

doit être fournie par l'alimentation du circuit et d'autre part, la chaleur créée doit être évacuée vers l'extérieur. La puissance dans une résistance peut être donnée par l'une des trois formules :

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Elle s'exprime en watts (symbole W). Les caractéristiques principales des éléments résistifs sont :

- la valeur nominale de la résistance ;
- la précision sur cette valeur ;
- la puissance maximale dissipable.

Valeurs normalisées

La valeur réelle d'une résistance est comprise dans une fourchette fixée par la valeur nominale et la précision. Par exemple, une résistance de 1 000 Ω à 10 % peut avoir une valeur comprise entre 900 Ω et 1 100 Ω puisque l'écart maximal par rapport à la valeur nominale 1 000 Ω est :

$$\frac{10}{100} \times 1\,000 = 100\ \Omega$$

On ne trouve dans le commerce que certaines valeurs particulières de résistances : ce sont les valeurs normalisées. Elles ont été choisies en fonction de la précision des éléments pour que les plages de tolérance ne se recouvrent pas. Le *tableau 1.1* précise les valeurs des séries E12 et E6 qui correspondent respectivement à des précisions de 10 % et 20 %. On n'a indiqué dans ce tableau que les valeurs comprises entre 10 et 100, mais on retrouve les mêmes chiffres pour d'autres ordres de grandeur : par exemple, on obtient les valeurs normalisées de 100 à 1 000 en ajoutant un zéro à tous les nombres du tableau. On trouve habituellement des résistances de quelques dixièmes d'ohm à quelques dizaines de mégohms, les valeurs les plus fréquentes étant comprises entre quelques centaines d'ohms et quelques mégohms. Pour les expérimentations courantes, on utilise en général les valeurs de la série E12 (précision 10 %).

Dans certains cas particuliers, on fait appel à des résistances de précision, par exemple des valeurs à 1 % de la série E96.

Tableau 1.1 – Échelonnement des valeurs normalisées dans les séries E12 et E6.

Série E12 (10 %)	Série E6 (20 %)
10	10
12	
15	15
18	
22	22
27	
33	33
39	
47	47
56	
68	68
82	

Marquage des résistances

Hormis quelques cas (résistances de précision ou de puissance) où le marquage est en clair (chiffres indiqués directement sur le corps des éléments), la plupart des résistances sont marquées par le code des couleurs. Quatre anneaux (cinq pour des résistances de précision) de couleur sont peints sur le composant comme le montre la *figure 1.5*. Chaque couleur correspond à un chiffre. Les deux premiers anneaux

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

donnent les deux chiffres significatifs de la valeur nominale de la résistance, le troisième anneau indique le nombre de zéros qu'il faut placer à droite des chiffres précédents pour obtenir effectivement la valeur et le quatrième anneau fournit la précision. Le *tableau 1.2* définit les conventions utilisées pour le marquage. Donnons un exemple : une résistance comporte quatre anneaux de couleurs respectives marron, vert, orange et argent (le sens de lecture se repère facilement car le dernier anneau est un peu séparé des autres). Les couleurs marron et vert indiquent que les chiffres significatifs sont 1 et 5. La bande orange nous dit qu'il faut ajouter 3 zéros à ces chiffres, ce qui fait une résistance de 15 000 Ω soit 15 kΩ. La précision de l'élément, définie par la couleur argent, est 10 %. La valeur obtenue est donc comprise entre 13,5 kΩ et 16,5 kΩ.

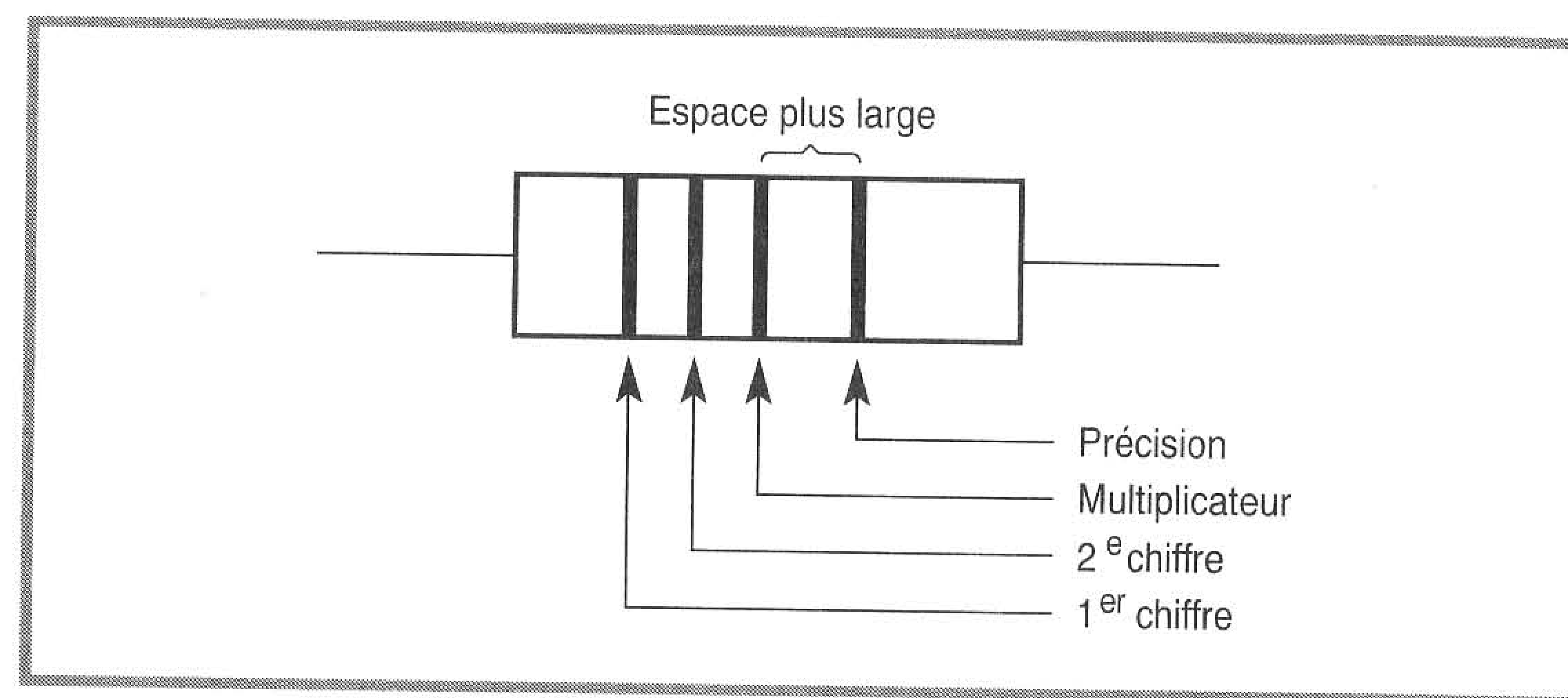


Figure 1.5 – Marquage d'une résistance par le code des couleurs.

Puissance maximale

Si la puissance demandée à une résistance est excessive, celle-ci peut norcir et même se détruire, mais elle peut aussi changer de valeur sans que cela apparaisse visiblement. Il est donc important de toujours vérifier que la puissance dissipée dans une résistance ne dépasse pas la limite autorisée. La puissance se calcule aisément par l'une des trois formules citées plus haut. Le maximum permis est $^1/_4$ W pour les résistances courantes, mais on utilise aussi, si nécessaire, des résistances de $^1/_2$ W, 1 W, 2 W ou plus. Les résistances de forte puissance ont des dimensions plus grandes. En l'absence d'indication contraire, il est sous-entendu qu'une résistance sur un schéma électronique a une puissance de $^1/_4$ W.

Tableau 1.2 – Signification du code des couleurs pour le marquage des résistances.

Couleur	1er anneau 1er chiffre	2e anneau 2e chiffre	3e anneau multiplicateur	4e anneau précision
argent			× 0,01 Ω	10 %
or			× 0,1 Ω	5 %
noir		0	× 1 Ω	20 %
marron	1	1	× 10 Ω	1 %
rouge	2	2	× 100 Ω	2 %
orange	3	3	× 1 kΩ	
jaune	4	4	× 10 kΩ	
vert	5	5	× 100 kΩ	
bleu	6	6	× 1 MΩ	
violet	7	7		
gris	8	8		
blanc	9	9		

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Technologie

Peu de problèmes pour la technologie des résistances : toutes les résistances courantes sont à couche de carbone. Les résistances de précision sont, elles, à couche métallique, ce qui leur donne des performances plus poussées mais aussi un prix plus élevé. Enfin les résistances de puissance sont en général bobinées. En l'absence de

précision, une résistance est donc à couche de carbone puisque c'est l'immense majorité des éléments utilisés en électronique.

Résistances variables

Il y a deux types de résistances variables : les potentiomètres de réglage et les résistances ajustables. Les potentiomètres sont les éléments qui permettent un réglage externe sur un appareil. Ils sont munis d'une tige qui peut recevoir un bouton de commande. Ces éléments ne peuvent pas être placés directement sur les supports de câblage sans soudure du fait de la taille de leurs pattes. Les ajustables sont des résistances qui permettent un réglage interne. Il faut un petit tournevis pour faire varier la résistance.

On utilise ces composants pour la mise au point d'un montage ou pour un réglage durable qui n'a pas à être accessible en permanence. Ces éléments peuvent être mis sur les supports de câblage et ce seront donc eux que nous utiliserons en priorité pour les expérimentations. Pratiquement, on trouve les ajustables de 100 Ω à 2,2 MΩ dans la série E3, c'est-à-dire avec comme chiffres significatifs 10, 22 et 47. La puissance dissipable est souvent $^1/_3$ W.

Associations de résistances

Deux résistances R_1 et R_2 branchées en série (*figure 1.6*) sont équivalentes à une résistance unique R telle que :

$$R = R_1 + R_2$$

Deux résistances R_1 et R_2 branchées en parallèle (*figure 1.7*) sont équivalentes à une résistance unique R telle que :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Enfin, une configuration très fréquente en électronique est le pont diviseur (*figure 1.8*). Si le pont diviseur est à vide, c'est-à-dire qu'il ne débite pas, le courant est le même dans les deux résistances et la tension aux bornes de la résistance R_2 est donc :

$$v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

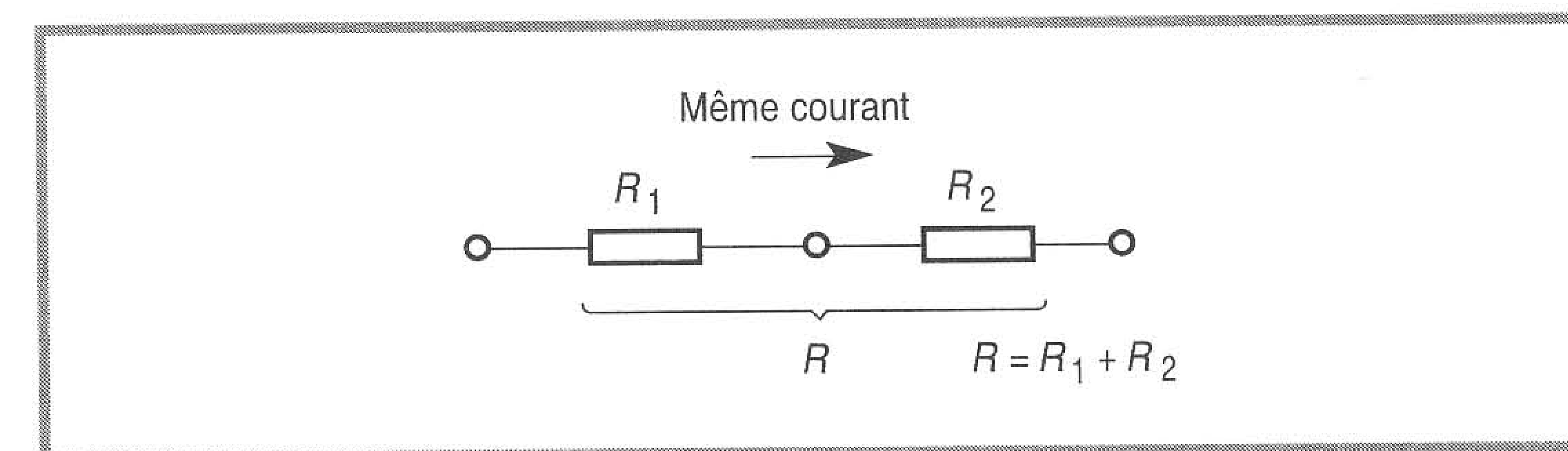


Figure 1.6 – Résistances en série.

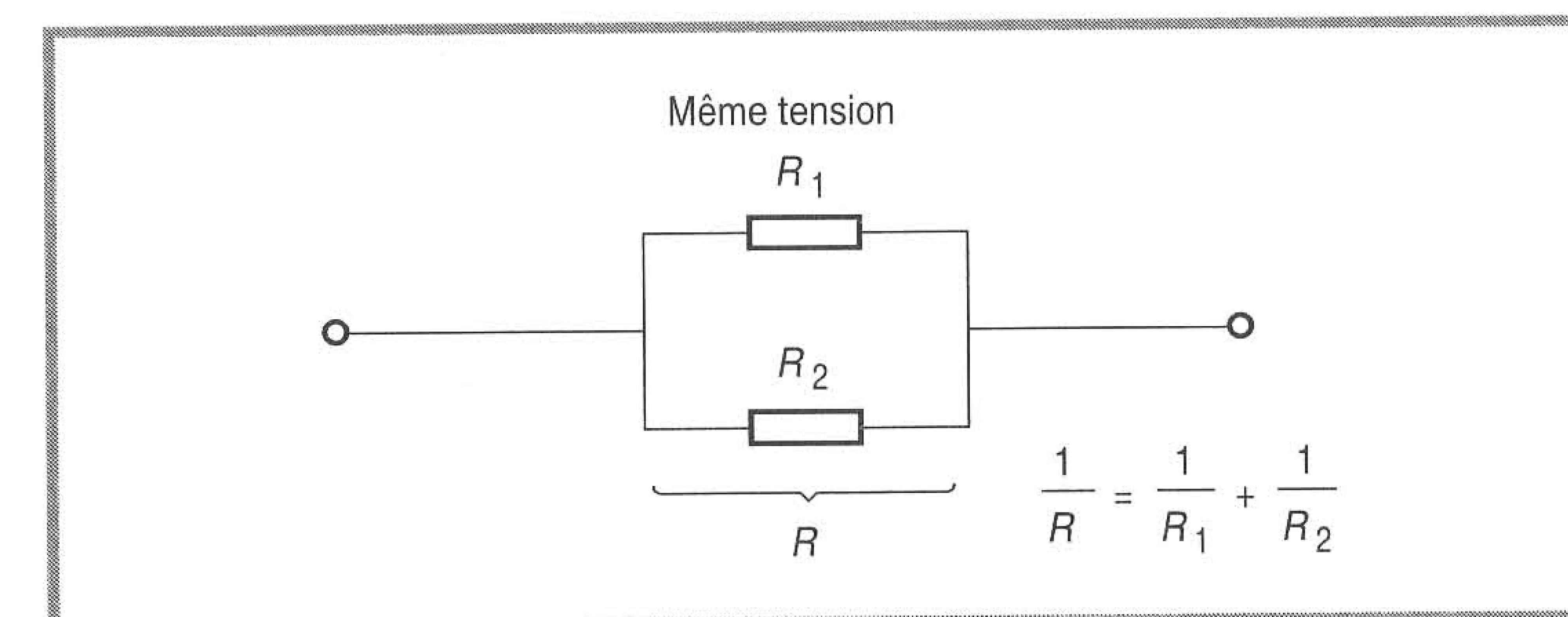


Figure 1.7 – Résistances en parallèle.

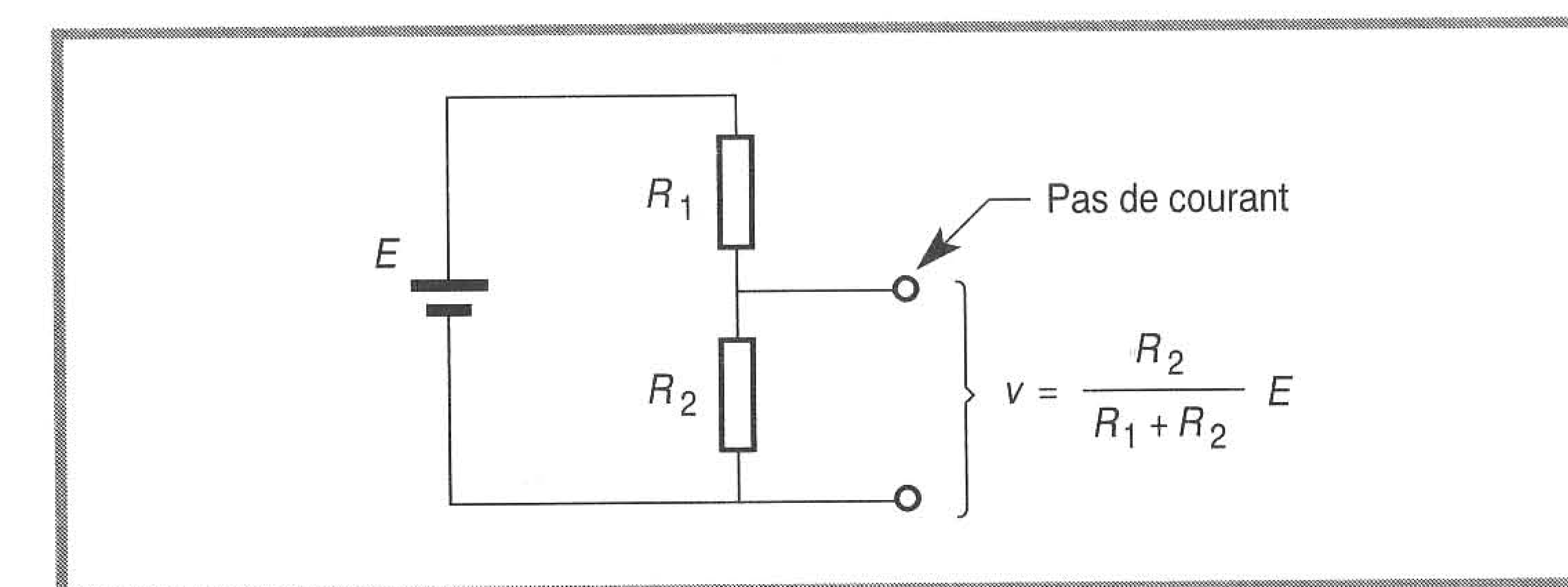


Figure 1.8 – Pont diviseur.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

1.4 Condensateurs

Le condensateur est le composant que l'on rencontre le plus fréquemment après la résistance, mais son fonctionnement est un peu plus complexe. Le condensateur est formé de deux armatures séparées par un isolant (le diélectrique). Aucun courant ne traverse donc cet élément, mais des charges viennent s'accumuler sur les armatures quand on applique une tension aux bornes du composant. Si l'on diminue ou que l'on annule la tension, les charges quittent les armatures. On peut donc considérer un condensateur comme un réservoir de charges que l'on peut remplir ou vider. Quand les variations de charge se font à travers une résistance, on constate que la durée du phénomène est d'autant plus longue que la résistance est élevée. Si l'on change de condensateur, on observe également que les durées s'allongent si la « capacité » de l'élément est plus élevée. Cette capacité est la principale caractéristique d'un condensateur. Elle s'exprime en farads (symbole F). Cette unité est grande et on utilise souvent les sous-multiples : le microfarad (µF) qui vaut un millionième de farad, le nanofarad (nF) qui vaut un millième de microfarad et le picofarad (pF) qui correspond à un millième de nanofarad. Le fait que le condensateur puisse faire évoluer des courants ou des tensions avec des durées variables est utilisé dans un certain nombre d'applications : temporisateurs, générateurs (voir chapitre 8)... En régime alternatif, le courant change de sens périodiquement et les condensateurs se chargent et se déchargent sans arrêt. Vu de l'extérieur, on a l'impression que le courant alternatif traverse le condensateur, mais il s'agit bien là d'une impression car aucune charge ne passe d'une armature à l'autre. Cependant, on dit dans la pratique qu'un condensateur coupe le continu mais laisse passer l'alternatif. C'est ce phénomène qui est utilisé dans les condensateurs de liaison : ces éléments permettent de transmettre la composante alternative d'un signal sans la composante continue lors d'une liaison entre deux étages. La relation qui existe entre la valeur efficace de la tension et la valeur efficace du courant pour un condensateur utilisé en régime sinusoïdal dépend de la capacité, mais aussi de la fréquence des signaux :

$$U = \frac{1}{2\pi f C} I$$

Par analogie avec la loi d'Ohm, on met cette relation sous la forme :

$$U = ZI$$

Z est l'impédance du condensateur et s'exprime en ohms comme une résistance :

$$Z = \frac{1}{2\pi f C}$$

Il faut toutefois remarquer deux différences essentielles entre une impédance et une résistance : l'impédance ne définit pas complètement la relation entre tension et courant, seules les valeurs efficaces apparaissent et on ne tient pas compte des déphasages ; en deuxième lieu, l'impédance n'est pas une caractéristique propre de l'élément comme une résistance, puisqu'elle dépend de la fréquence des signaux et ne s'applique qu'au cas particulier du régime sinusoïdal. La variation de l'impédance avec la fréquence est utilisée dans les filtres (voir chapitre 5).

Les caractéristiques principales des condensateurs sont :
- la valeur nominale de la capacité ;
- la précision sur cette valeur ;
- la tension maximale d'utilisation.

Valeurs normalisées

Comme pour les résistances, on ne trouve que des condensateurs dont les capacités ont certaines valeurs dites normalisées. Les séries sont les mêmes, mais pour les expérimentations courantes, on se contente d'une série E6 pour les capacités. Comme on dispose de moins de valeurs pour les condensateurs que pour les résistances, on commence en général dans la conception d'un montage par choisir les capacités puis les résistances. On trouve habituellement des capacités entre un picofarad et quelques milliers de microfarads.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Marquage des condensateurs

Contrairement aux résistances dont le marquage est bien standardisé, les condensateurs ont des présentations très variées et l'indication de la capacité se fait avec diverses méthodes. Dans quelques cas, on rencontre un marquage par le code des couleurs comme le montre la *figure 1.9*. Les différents anneaux sont ici jointifs. Les deux premières bandes donnent les chiffres significatifs de la capacité et la troisième, le multiplicateur. Il faut prendre garde au fait que la valeur est indiquée en picofarads. La quatrième bande donne la précision et la cinquième la tension maximale d'utilisation. Le *tableau 1.3* précise les correspondances.

Prenons un exemple : un condensateur est marqué bleu, gris, jaune, blanc et rouge (la première bande est celle du haut). Sa capacité est de 680 000 pF, soit 680 nF, sa précision est de 10 % et sa tension maximale de 250 V. La plupart des condensateurs sont marqués en clair, mais tous les constructeurs n'adoptent pas les mêmes conventions. Pour certains, il n'y a aucune indication d'unité et la valeur est en picofarads : par exemple 331 signifie 33 et 1 zéro donc 330 pF. Pour d'autres, un symbole précise l'unité : par exemple un marquage 47 n 400 veut dire que le condensateur a une capacité de 47 nF et une tension maximale de 400 V.

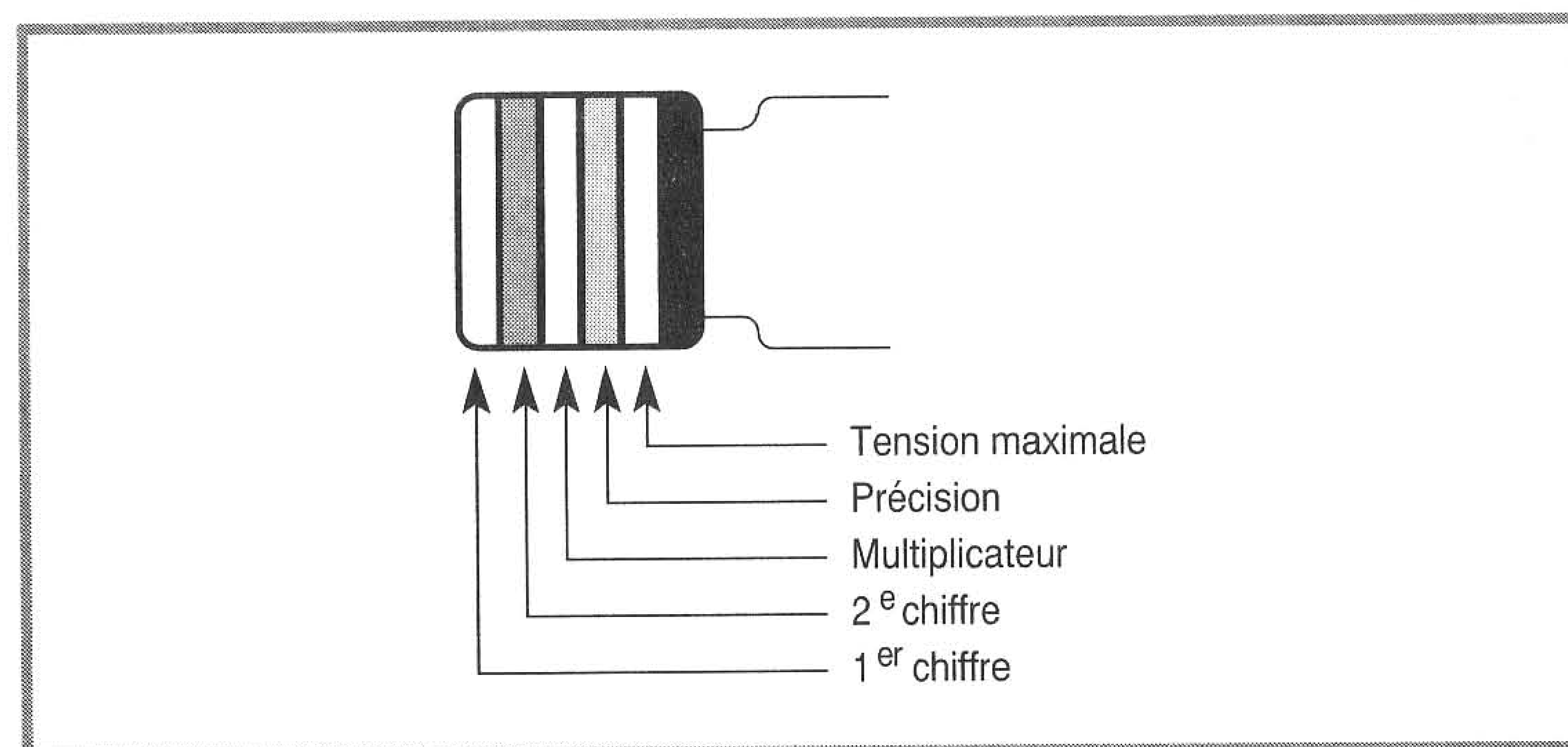


Figure 1.9 – Marquage des condensateurs par le code des couleurs.

Tableau 1.3 – Signification du code des couleurs pour le marquage des condensateurs.

Couleur	1er anneau 1er chiffre	2e anneau 2e chiffre	3e annneau multiplicateur	4e anneau précision	5e anneau tension maximale
noir		0		20 %	
marron	1	1	× 10 pF		
rouge	2	2	× 100 pF		250 V
orange	3	3	× 1 nF		
jaune	4	4	× 10 nF		400 V
vert	5	5	× 100 nF		
bleu	6	6	× 1 µF		
violet	7	7	× 10 µF		
gris	8	8			
blanc	9	9		10 %	

Tension maximale

Si la tension appliquée au condensateur devient trop importante, il peut y avoir claquage du diélectrique et donc destruction du composant. Le constructeur précise une tension maximale de service qui dépend beaucoup de la technologie de fabrication et de la valeur de la capacité.

Technologie

De nombreuses technologies sont utilisées dans la fabrication des condensateurs. Leur emploi dépend essentiellement de l'ordre de grandeur de la capacité, mais aussi de leur rôle. On trouve tout d'abord les condensateurs céramique. Les valeurs s'étendent de 1 pF

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

à 100 nF et leurs performances sont bonnes aux fréquences élevées. On les utilise donc en particulier pour le découplage des hautes fréquences. En deuxième lieu, on a les condensateurs plastique. On en trouve une grande variété : polystyrène, polyester, polycarbonate, polypropylène... Les valeurs s'échelonnent en général entre 1 nF et quelques microfarads. Leur bonne qualité, leur tension maximale élevée (quelques centaines de volts) et leur précision correcte en font les condensateurs d'usage général. Lorsque les capacités souhaitées sont plus importantes, on fait appel aux condensateurs tantale dont les valeurs vont de 0,1 µF à 47 µF environ. Ces condensateurs sont polarisés (la tension présente à leurs bornes doit toujours être dans un sens donné) et les tensions maximales sont de l'ordre de la dizaine ou de quelques dizaines de volts. Enfin, pour les très fortes valeurs, on utilise des condensateurs chimiques (ou électrolytiques). On peut obtenir des capacités de 1 µF à 4 700 µF, parfois plus. Ces éléments sont polarisés, ont des tensions de claquage faibles (dizaine de volts ou un peu plus). Leur qualité est médiocre : les pertes sont importantes et la précision sur la capacité est de plusieurs dizaines de %. Enfin, ils n'agissent qu'aux fréquences basses. On les utilise en particulier pour le filtrage des alimentations.

1.5 Transformateurs

Lorsque c'est possible, on évite en électronique de basse fréquence l'usage des bobinages qui sont lourds et encombrants. On doit cependant parfois y faire appel en particulier pour le transformateur d'alimentation (voir chapitre 6). Le principe d'un transformateur est donné à la *figure 1.10*. Deux bobinages sont enroulés sur un noyau de fer. Quand on alimente l'une de ces bobines par une source de tension alternative, il y a création d'un flux variable dans le noyau et donc obtention d'une force électromotrice d'induction dans la deuxième bobine. Si l'on referme le deuxième enroulement sur une charge, il y a circulation d'un courant. Comme il n'y a aucun contact électrique entre les deux bobines, la première fonction remplie par un transformateur est l'isolement.

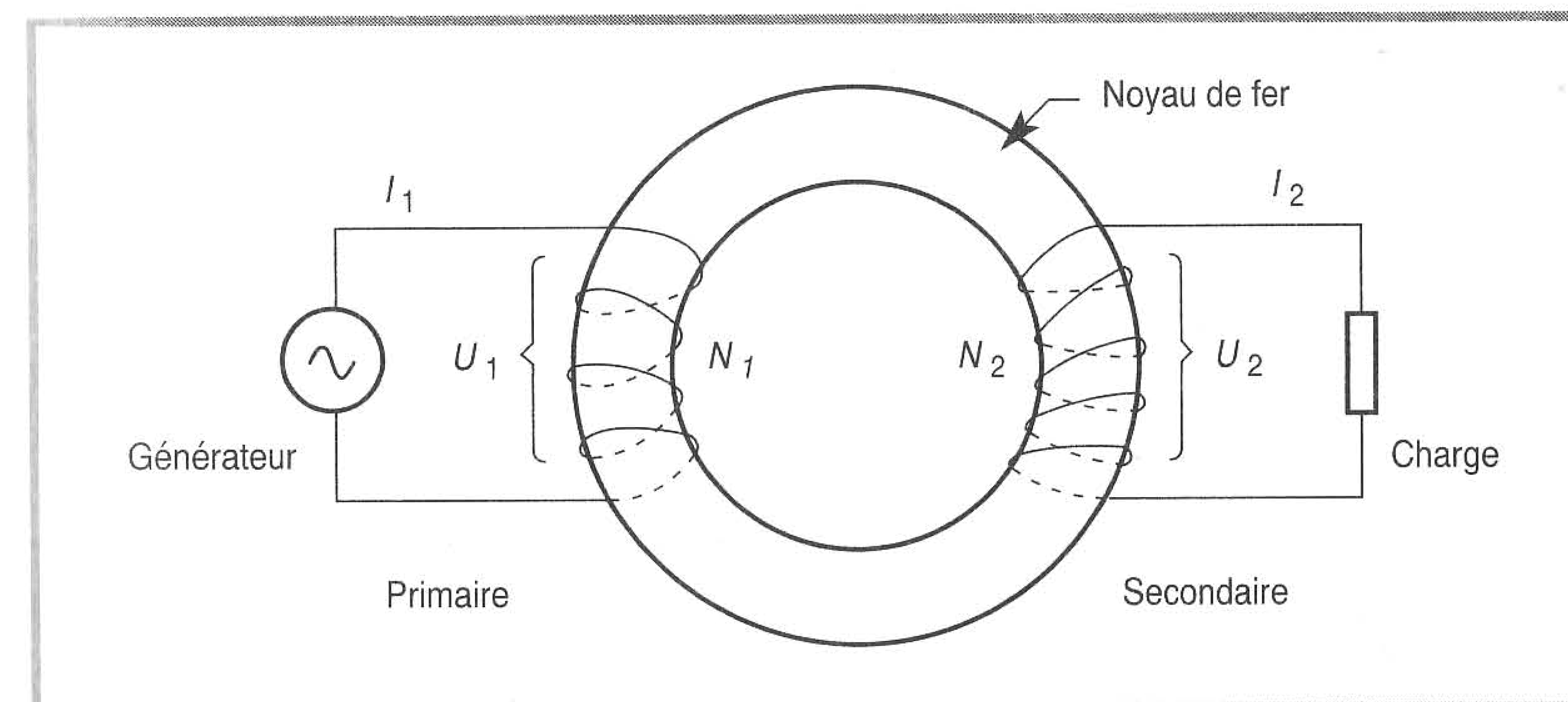


Figure 1.10 – Principe du transformateur.

Ensuite, si le nombre de spires des deux enroulements est différent, on obtient aux bornes de la deuxième bobine une tension de même forme que celle de la source, mais de valeur efficace différente. On a, à vide :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

N_1 et N_2 étant les nombres de spires des deux enroulements nommés primaire et secondaire. En charge, la tension U_2 est un peu plus faible que ce qui est prévu par la relation précédente. En ce qui concerne les courants, on peut écrire, de manière approchée :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Les principales caractéristiques d'un transformateur sont :

– les tensions au primaire et au secondaire ;

– le courant maximal qu'on peut débiter en sortie.

À la place de ce dernier paramètre, on donne parfois la puissance apparente, produit des valeurs efficaces de la tension et du courant :

$$S = U_2 I_2$$

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

1.6 Diodes

La diode est un composant formé d'un semi-conducteur (le silicium en général) sur lequel a été créée une jonction. Son comportement est simple : une diode a deux états : bloqué ou passant. Une diode bloquée n'est parcourue par aucun courant. Une diode passante est traversée par un courant, mais la tension à ses bornes reste sensiblement constante, autour de 0,6 à 0,7 V. Pour choisir l'état de la diode, il faut la polariser. Les deux bornes d'une diode ne sont pas équivalentes comme celles d'une résistance : on distingue l'anode (A) et la cathode (K). Ces deux points sont repérés sur le symbole de la diode à la *figure 1.11*. Pour les diodes courantes, la cathode est indiquée sur le boîtier par une bande comme le montre la *figure 1.12*.

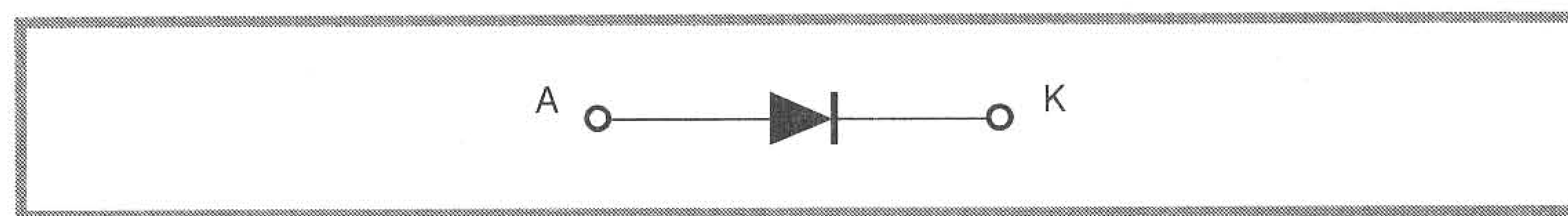


Figure 1.11 – Distinction entre anode et cathode sur le symbole d'une diode.

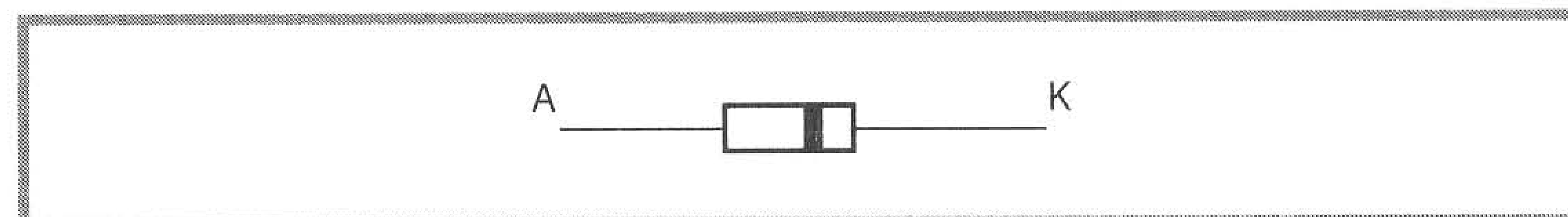


Figure 1.12 – Repérage de la cathode sur le corps d'une diode.

Pour que la diode soit passante, il faut la polariser en direct, comme c'est le cas de la *figure 1.13* : une tension *E* supérieure au seuil 0,6 V est appliquée par l'intermédiaire d'une résistance, le pôle + du générateur étant du côté de l'anode. Il y a alors circulation du courant dans le sens de la flèche. La chute de tension dans la résistance correspond à l'écart entre *E* et 0,6 V.

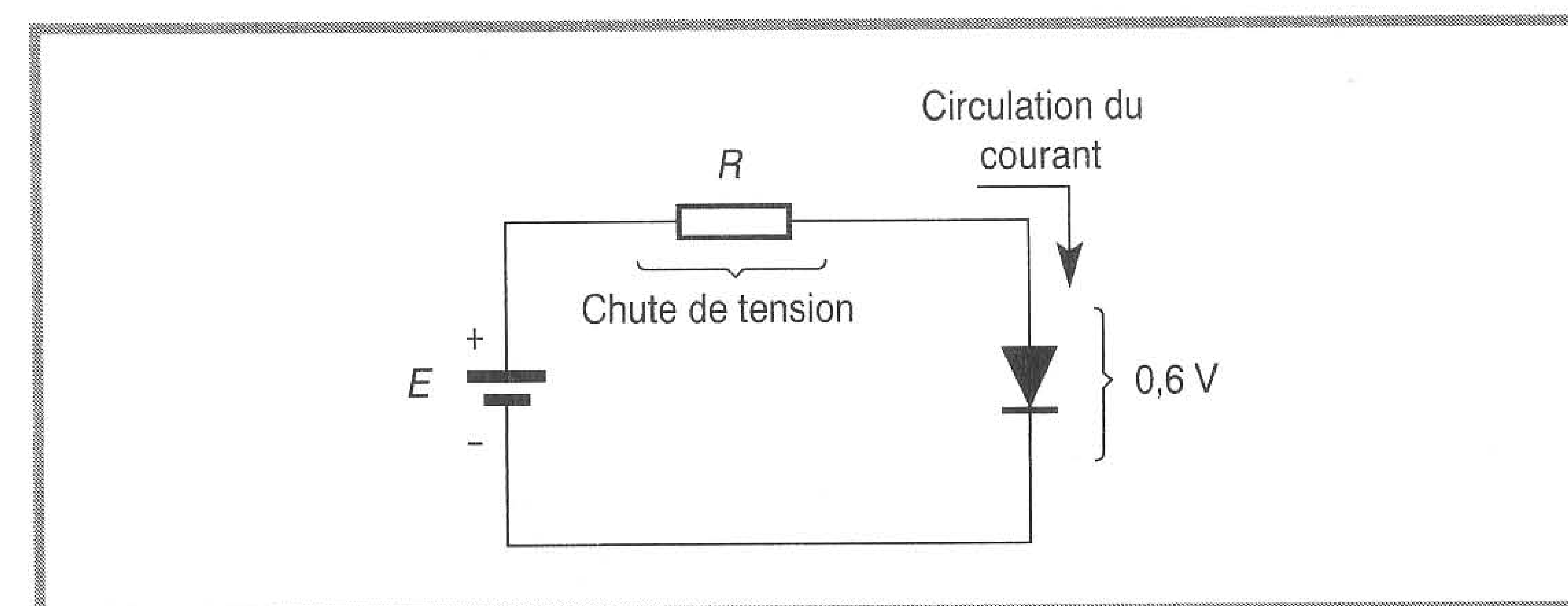


Figure 1.13 – Polarisation d'une diode en direct.

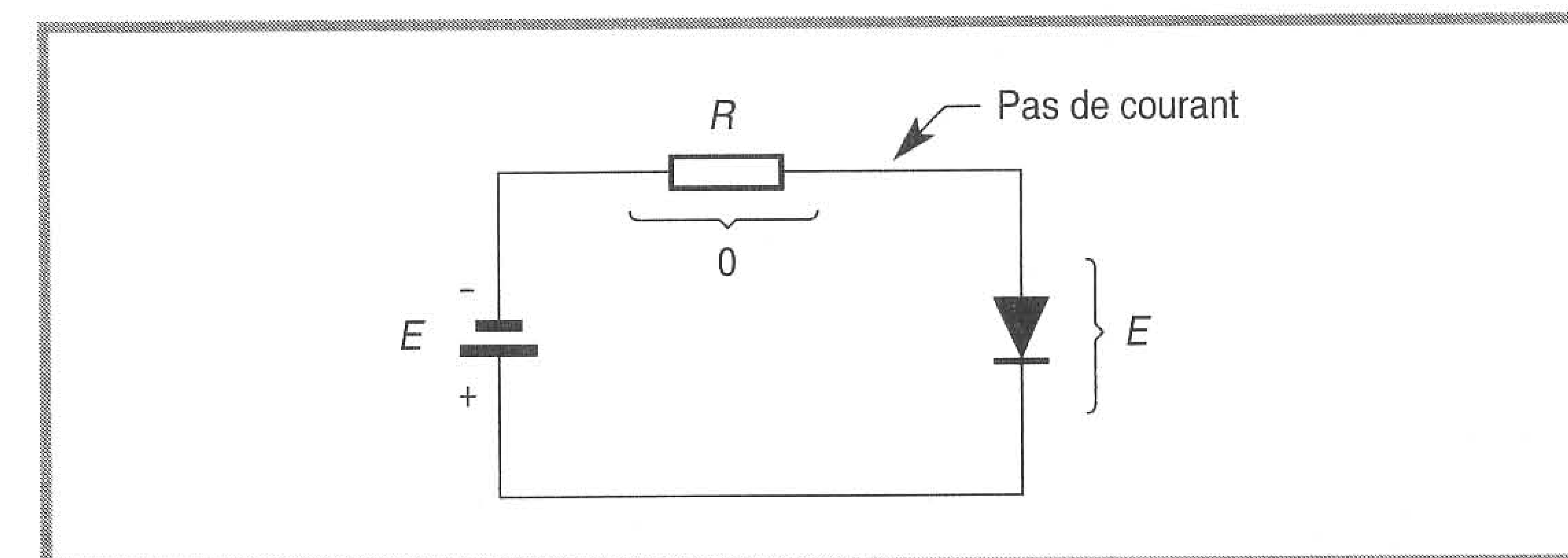


Figure 1.14 – Polarisation d'une diode en inverse.

La diode est bloquée si elle est polarisée en inverse comme sur la *figure 1.14* : le courant est alors nul et la tension aux bornes de la diode est directement *E*. On constate donc que le courant dans une diode ne peut circuler que dans un sens. On utilise cette propriété pour le redressement des tensions alternatives, particulièrement pour les alimentations (voir chapitre 6). On peut aussi se servir de diodes pour aiguiller un courant dans une branche ou une autre (voir chapitre 8). On trouve aussi des diodes pour assurer la protection de certains circuits (elles écrêtent les tensions en certains points en devenant passantes). On trouve enfin des diodes employées pour créer une non-linéarité (voir chapitre 9).

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Les caractéristiques principales d'une diode sont :

- le courant maximal (en direct) ;
- la tension maximale (en inverse) ;
- la rapidité.

On rencontre souvent deux types de diodes : les diodes de signal (par exemple la 1N4148) sont des diodes rapides qui supportent des tensions et des courants assez faibles ; les diodes de redressement (par exemple la 1N4004) sont plus lentes, mais supportent des tensions et des courants importants (400 V et 1 A pour le modèle cité). Comme leur nom l'indique, les diodes de redressement trouvent leur emploi pour le redressement des alimentations continues tandis que les diodes de signal sont placées dans la plupart des montages qui ne traitent pas une puissance élevée. Malgré le nombre élevé de références de diodes qu'on peut rencontrer, les deux modèles cités plus haut permettent de couvrir la majorité des besoins courants. Parfois, on fera appel à des diodes un peu plus grosses (un courant maximal de 3 A est assez souvent rencontré), dans les montages redresseurs d'une certaine puissance.

Diodes Zener

Une diode Zener est une diode particulière prévue pour un fonctionnement en polarisation inverse. En effet, à partir d'une certaine tension inverse, la diode se met à conduire et un courant circule dans le sens opposé au sens normal. On utilise ces diodes pour stabiliser une tension afin d'en faire par exemple une référence. L'application du chapitre 3 décrit une source de tension à base de diode Zener.

Les principaux paramètres qui caractérisent une diode Zener sont :

- la tension nominale ;
- la puissance dissipable.

On trouve le plus couramment des diodes Zener qui peuvent dissiper 400 mW. Il faut calculer la résistance associée à la diode pour ne pas dépasser cette valeur (voir un exemple de calcul au chapitre 3).

1.7 Transistors

Le transistor est le composant qui a permis le développement de l'électronique moderne. Son rôle est bien moindre aujourd'hui à cause du développement des circuits intégrés (qui sont en fait eux-mêmes formés d'une grande quantité de transistors). On trouve pourtant encore un certain nombre de transistors « discrets » (c'est-à-dire seuls dans leur boîtier) dans plusieurs domaines : les fortes puissances et la haute fréquence en particulier.

Un transistor est un composant à trois bornes : la base, le collecteur et l'émetteur, repérés sur les symboles comme le montre la *figure 1.15*. Le sens de la flèche tracée dans l'émetteur distingue deux types de transistors : le NPN et le PNP. Le transistor peut avoir trois états : bloqué, saturé et passant en régime linéaire.

On considère le cas NPN. À l'état bloqué, aucun courant ne circule dans le composant. Pour obtenir cet état, il faut polariser négativement la base par rapport à l'émetteur. À l'état saturé, la tension entre collecteur et émetteur est très faible. Pour obtenir cela, il faut polariser positivement la base par rapport à l'émetteur et imposer un courant de base assez élevé. Ce sont ces deux états qui sont utilisés dans les montages en commutation : le transistor se comporte entre l'émetteur et le collecteur comme un interrupteur commandé par la base.

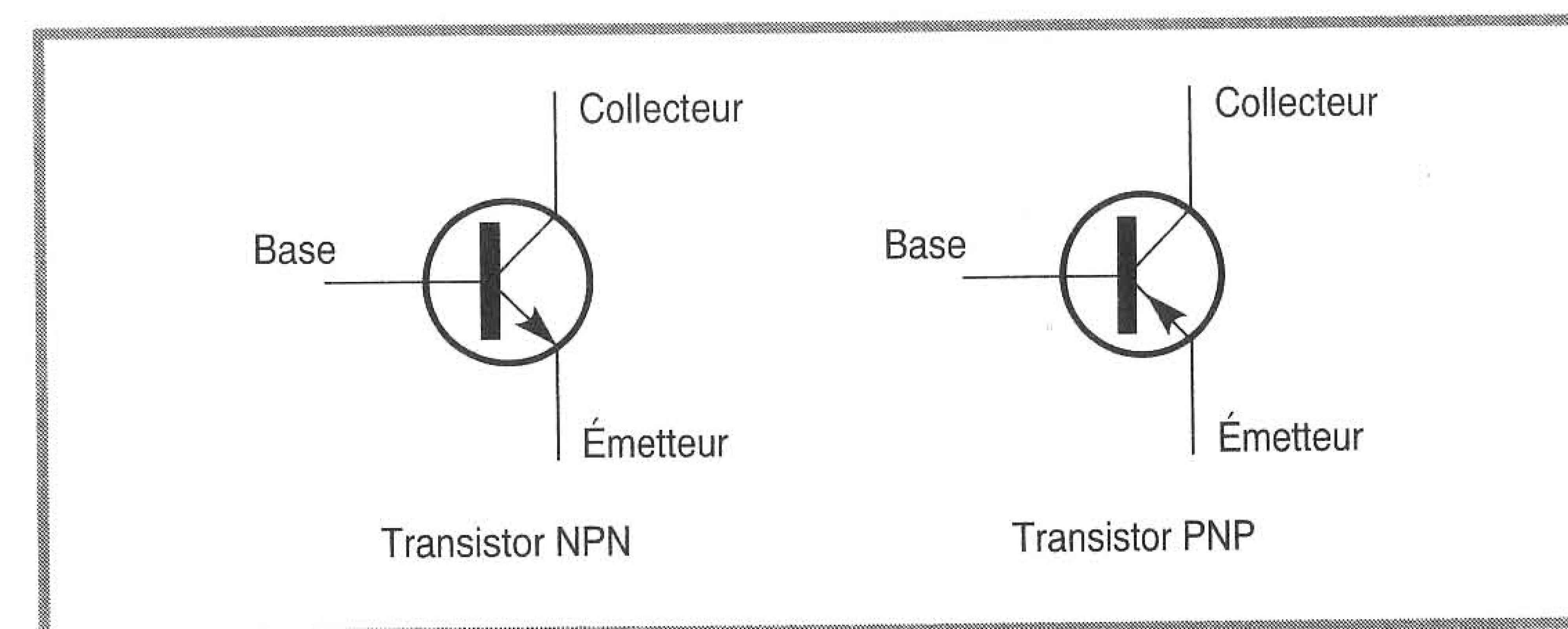


Figure 1.15 – Dénomination des trois bornes d'un transistor.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Le troisième état est utilisé pour les amplificateurs : le transistor passant en régime linéaire correspond à une polarisation en direct de la base par rapport à l'émetteur, mais avec un courant insuffisant pour obtenir la saturation. Le schéma de principe est représenté à la *figure 1.16*.

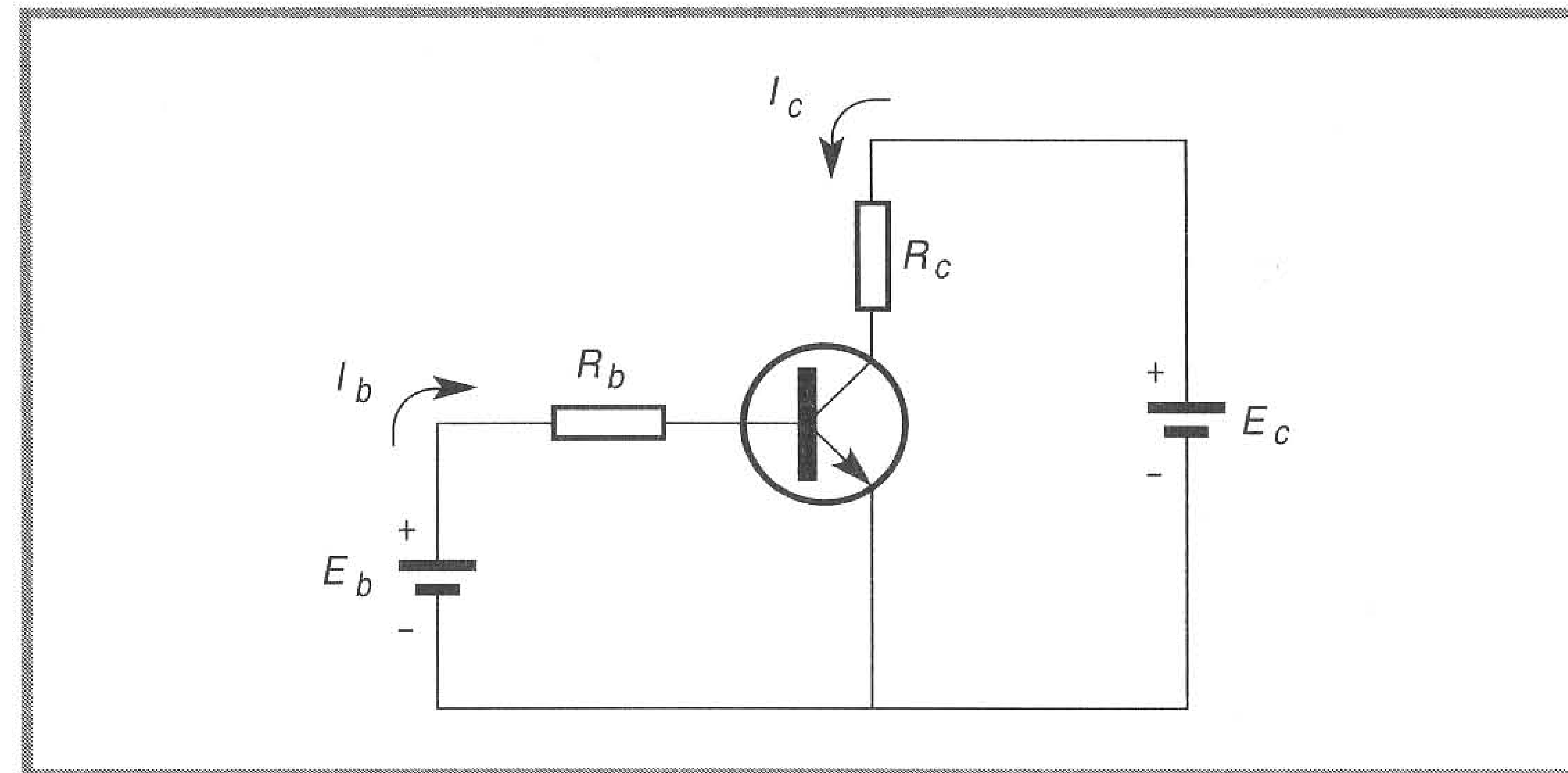


Figure 1.16 – Principe de la polarisation d'un transistor NPN.

Le courant de collecteur I_C est commandé par le courant de base I_B :

$$I_C = \beta I_B$$

Le coefficient β (béta) est le gain du transistor. Pour les petits transistors, il est de l'ordre de plusieurs centaines tandis que pour les plus gros transistors, sa valeur tombe à quelques dizaines. On peut ainsi utiliser le transistor en amplification de courant. Le chapitre 4 donne un exemple de montage à transistors.

Il existe de très nombreuses références de transistors, mais en fait quelques modèles suffisent pour couvrir les besoins courants. Par exemple, les types 2N2219 (NPN) et 2N2905 (PNP) permettent de réaliser tous les montages de puissance et de rapidité raisonnables. On aura éventuellement besoin d'autres transistors pour pouvoir dissiper des puissances plus importantes et parfois des transistors plus rapides pour les montages aux hautes fréquences.

1.8 Circuits intégrés

C'est la deuxième étape importante de l'électronique moderne. Un circuit intégré est formé d'une petite pastille de silicium qui contient un grand nombre de transistors et de résistances. Il permet de remplacer des montages à transistors discrets en ayant un encombrement bien moindre, une fiabilité accrue et en plus une facilité d'utilisation sans précédent. En effet, la mise au point d'un montage à transistors discrets devient vite assez longue dès qu'on atteint une certaine complexité alors que la plupart des montages à circuits intégrés ne demandent aucune mise au point expérimentale : si le montage est bien conçu, son fonctionnement correspond parfaitement aux prévisions.

On trouve deux catégories de circuits intégrés : ceux dont l'usage est très général comme l'amplificateur opérationnel (voir chapitres 3 et 9) qu'on traite un peu comme un super-transistor et ceux dont l'usage est plus spécifique comme par exemple le régulateur de tension (voir chapitre 6).

Chapitre 2

Appareils de mesure

Le contrôle et la mise au point d'un montage électronique rendent nécessaire l'emploi d'appareils de mesure. On se propose dans ce chapitre de décrire les quelques instruments courants qui forment la base de tout laboratoire d'électronique. Ce matériel est suffisant pour de nombreuses expérimentations, mais peut être complété en fonction des spécialisations diverses.

2.1 Multimètre

Différents types

Le multimètre est l'appareil de base de l'électronicien. C'est un instrument qui assure plusieurs fonctions : voltmètre (mesure de tensions), ampèremètre (mesure d'intensités) et ohmmètre (mesure de résistances) pour les modèles de base, mais aussi testeur de transistor, capacimètre (mesure de capacités) ou fréquencemètre (mesure de fréquences) pour des appareils plus sophistiqués.

Les mesures de tensions et d'intensités peuvent se faire en continu ou en alternatif. Il faut ici distinguer deux types de multimètres. Les appareils bas de gamme ne permettent, sur la position « alternatif », que des lectures de valeurs efficaces en sinusoïdal. Par contre les appareils qualifiés de « valeur efficace vraie » donnent un résultat valable pour des signaux de forme quelconque. Il faut aussi faire attention à la fréquence maximale d'utilisation de l'appareil : les multimètres simples ne fournissent une mesure correcte que si la

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

fréquence ne dépasse pas quelques centaines de hertz ou quelques kilohertz suivant les modèles.

Les multimètres de table sont des appareils assez encombrants et alimentés par le secteur. Leurs performances sont en général élevées et on les rencontre dans les laboratoires. Les multimètres portables sont au contraire de petit format et alimentés par pile (*figure 2.1*). On peut ainsi les utiliser partout. Les performances sont modestes pour les appareils bon marché, mais on peut aussi rencontrer des appareils très élaborés sous cette présentation.

Caractéristiques

Une caractéristique essentielle d'un instrument numérique est son nombre de points. En effet, le chiffre le plus à gauche sur l'affichage de l'appareil ne peut souvent prendre que les valeurs 0 ou 1, ce qui veut dire qu'avec quatre chiffres, on peut obtenir des nombres de 0000 à 1999. Un tel appareil sera appelé 2 000 points, puisqu'il y a 2 000 nombres différents qui peuvent être affichés. Une deuxième caractéristique essentielle est donnée par les différents calibres de lecture. Le calibre est la valeur maximale qui peut être indiquée pour une position donnée du sélecteur de gammes. Par exemple, un appareil 2 000 points utilisé sur un calibre 2 V permet des mesures entre 0,001 V et 1,999 V. Encore faut-il examiner la validité du résultat au vu de la précision de l'instrument. Celle-ci peut être indiquée de plusieurs manières dans la notice de l'appareil. Elle chiffre l'erreur maximale engendrée par le multimètre. Par exemple, une notice dit : précision ± 1 % de la lecture ± 1 point. En mesurant 1 V sur le calibre 2 V, l'erreur maximale commise est égale à la somme de 1 % de la lecture 1 V et d'un point sur le calibre 2 V :

$$\frac{1}{100} + 1 \times 0{,}001 = 0{,}011 \text{ V}$$

On voit bien qu'une lecture de 2 mV sur le calibre 2 V n'a aucune signification puisque l'erreur commise est supérieure à un point qui correspond ici à 1 mV. Cela montre qu'il faut choisir le calibre le mieux adapté si l'on veut conserver une bonne précision à la mesure.

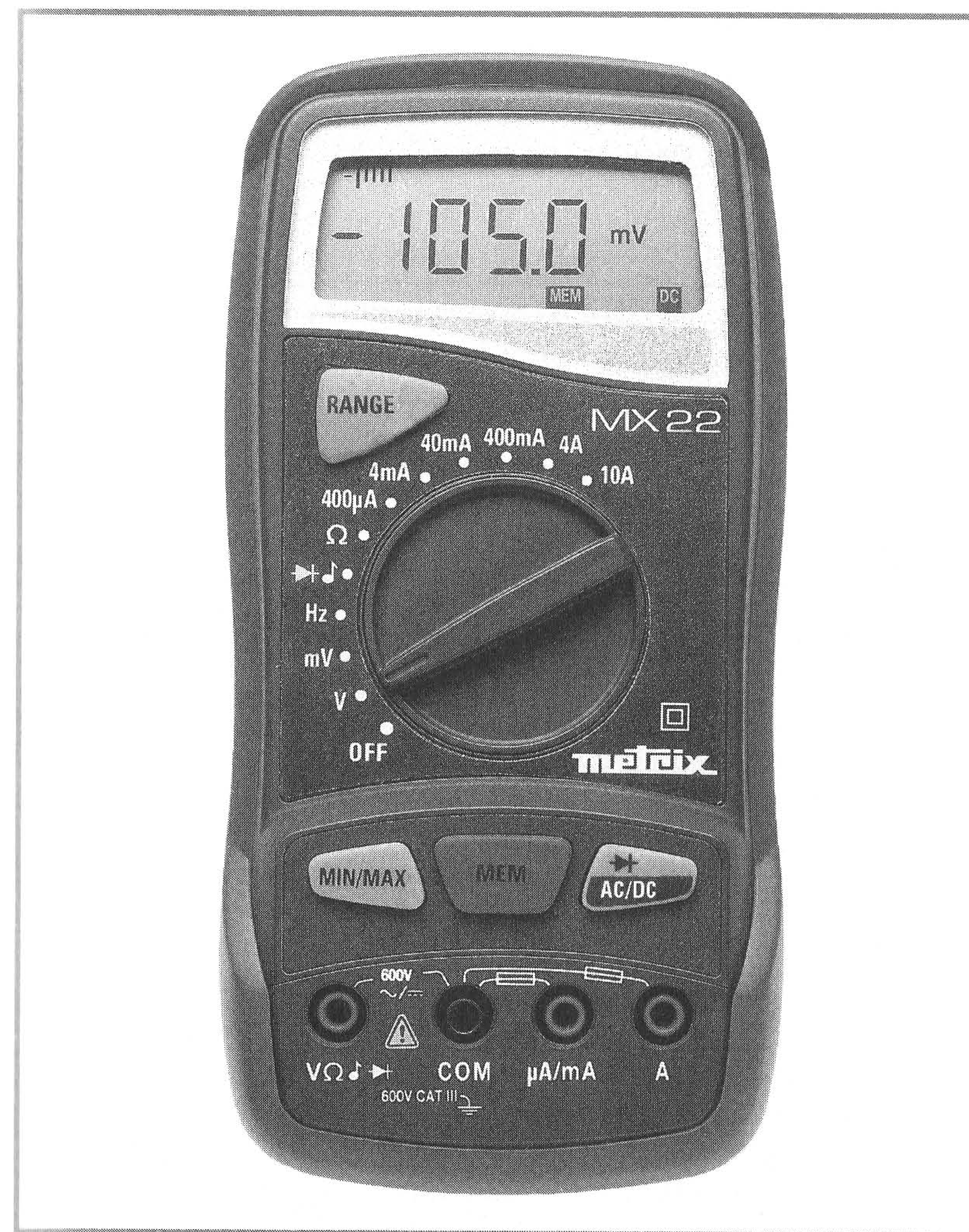


Figure 2.1 – Multimètre MX22 (document Metrix).

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Méthodes de mesure

Mesure des tensions

Pour effectuer une mesure de tension, on place le commutateur de l'appareil sur la fonction « voltmètre » et on branche le multimètre en parallèle, en reliant ses deux bornes aux points entre lesquels on désire mesurer la tension (*figure 2.2*).

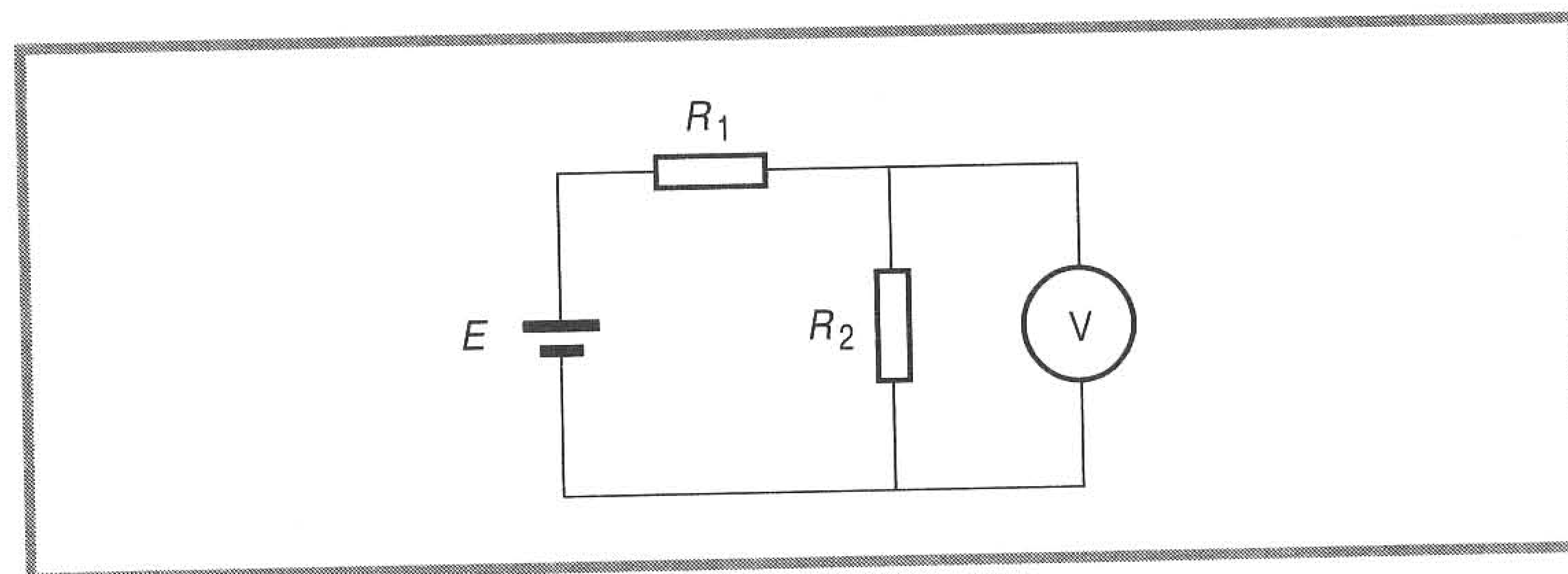


Figure 2.2 – Mesure de la tension aux bornes de la résistance R_2.

En continu, la lecture peut être positive ou négative selon que l'on a relié la borne + du voltmètre au point le plus positif ou le plus négatif. Si l'on ignore l'ordre de grandeur de la tension à mesurer, on commence par le plus grand calibre et on le diminue progressivement pour obtenir la lecture la plus précise possible.

Mesure des courants

Pour effectuer une mesure d'intensité, on place le commutateur de l'appareil sur la fonction « ampèremètre » et on branche le multimètre en série dans la connexion dans laquelle on veut mesurer l'intensité (*figure 2.3*).

En continu, la lecture est positive si le courant entre par la borne + dans le multimètre, négative dans le cas contraire. Le branchement d'un ampèremètre numérique permet donc, en continu, de connaître le sens du courant. Le choix des calibres se fait comme pour un voltmètre. L'utilisation d'un ampèremètre oblige à couper la con-

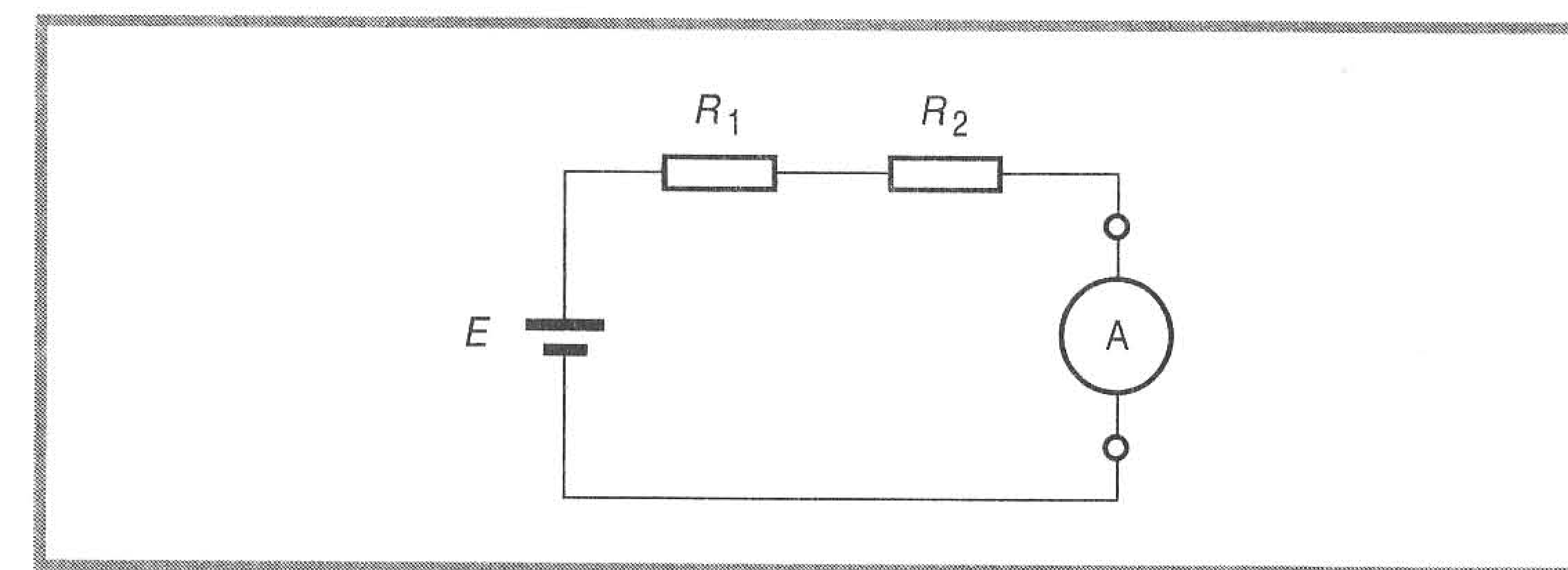


Figure 2.3 – Mesure de l'intensité dans la résistance R_2.

nexion du circuit à étudier. Cela ne pose pas de problème sur un câblage en fils volants, mais il est difficile de faire la même chose sur un montage réalisé sur un circuit imprimé. C'est pourquoi on détermine souvent des intensités par la mesure d'une tension aux bornes d'une résistance, en s'aidant de la loi d'Ohm. Toutefois, cette méthode n'est pas très précise à cause de la tolérance sur la valeur des résistances courantes.

Mesure des résistances

Pour mesurer une résistance, on met le multimètre sur la fonction « ohmmètre » et on le place aux bornes de la résistance, déconnectée de son montage. Après choix du calibre le plus adapté, la lecture de la valeur de la résistance est directe. Il est ainsi très facile de mesurer une résistance avant de la placer dans un montage. On connaît alors sa valeur de façon beaucoup plus précise que par simple lecture du code des couleurs.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

2.2 Oscilloscope

Oscilloscope analogique

Le multimètre fait vite apparaître ses limites. En continu, il donne bien la valeur d'une tension ou d'un courant, mais en alternatif, il ne

donne qu'une partie des renseignements utiles. Il mesure une valeur efficace, mais ne donne aucune indication sur la forme des signaux ou leur rapidité. L'oscilloscope, lui, permet de voir directement l'évolution d'une tension au cours du temps sur un écran. On peut ainsi connaître la valeur instantanée d'un signal, à condition qu'il soit périodique. Un oscilloscope se branche comme un voltmètre. Pour voir l'image d'un courant, il suffit d'observer la tension aux bornes d'une résistance parcourue par ce courant. Tous les oscilloscopes se présentent à peu près de la même façon (*figure 2.4*).

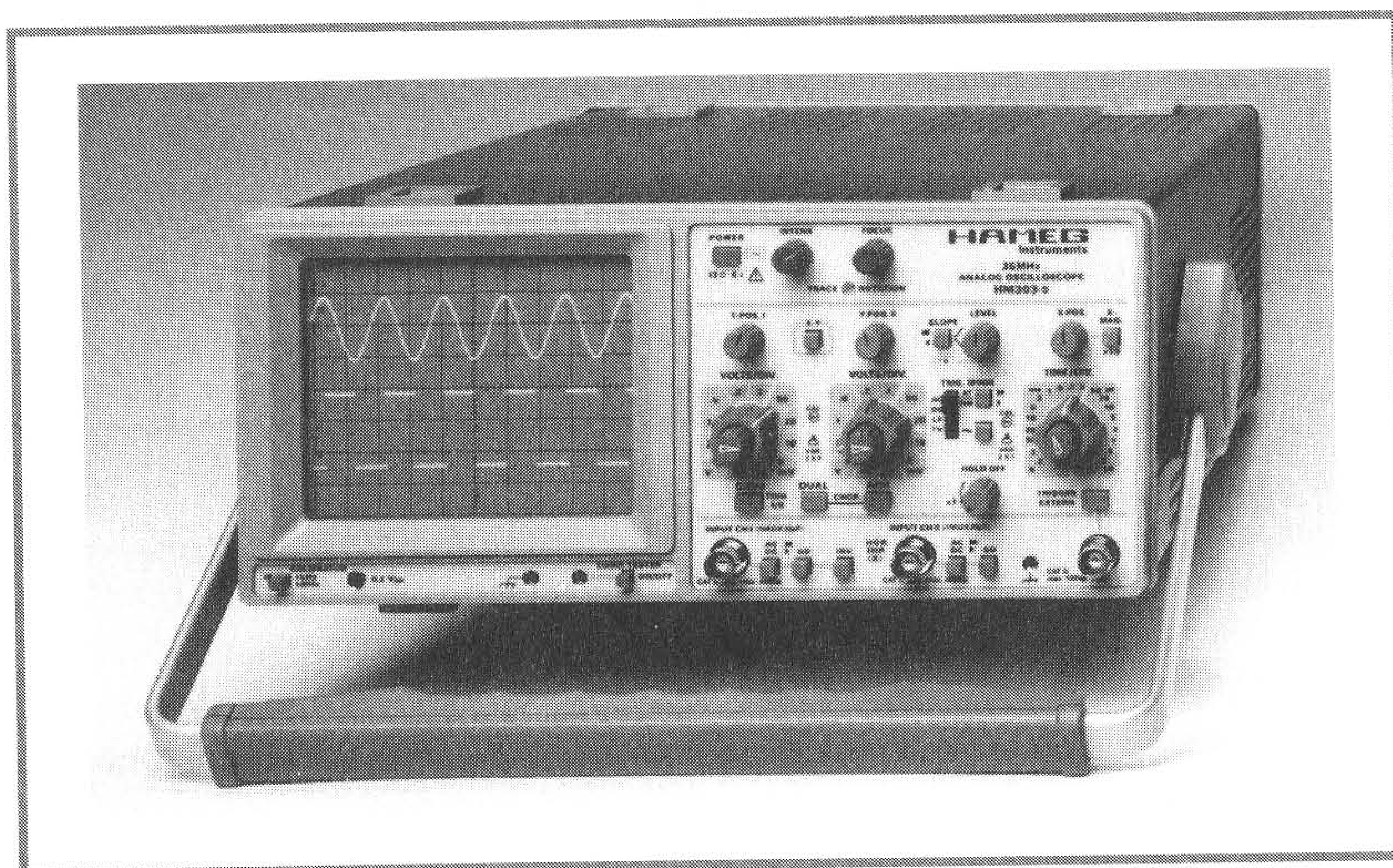


Figure 2.4 – Oscilloscope HM303-5 (document Hameg Instruments).

Oscilloscope numérique

On trouve aujourd'hui de plus en plus d'oscilloscopes numériques. Ces appareils remplissent le même rôle que les oscilloscopes analogiques, mais ont des possibilités supplémentaires. Le principe est de numériser les signaux pour les stocker dans une mémoire. Il est ainsi

possible d'observer des tensions, qu'elles soient ou non périodiques, et d'obtenir ainsi des renseignements beaucoup plus complets sur les montages à tester en explorant les phénomènes transitoires invisibles sur un oscilloscope ordinaire. Les résultats peuvent être plus facilement exploités en raison de leur présentation sous forme numérique : transfert vers un ordinateur pour traitement par des logiciels spécifiques, archivage des données, impression des courbes…

L'appareil se présente sous la même forme qu'un oscilloscope analogique (*figure 2.5*).

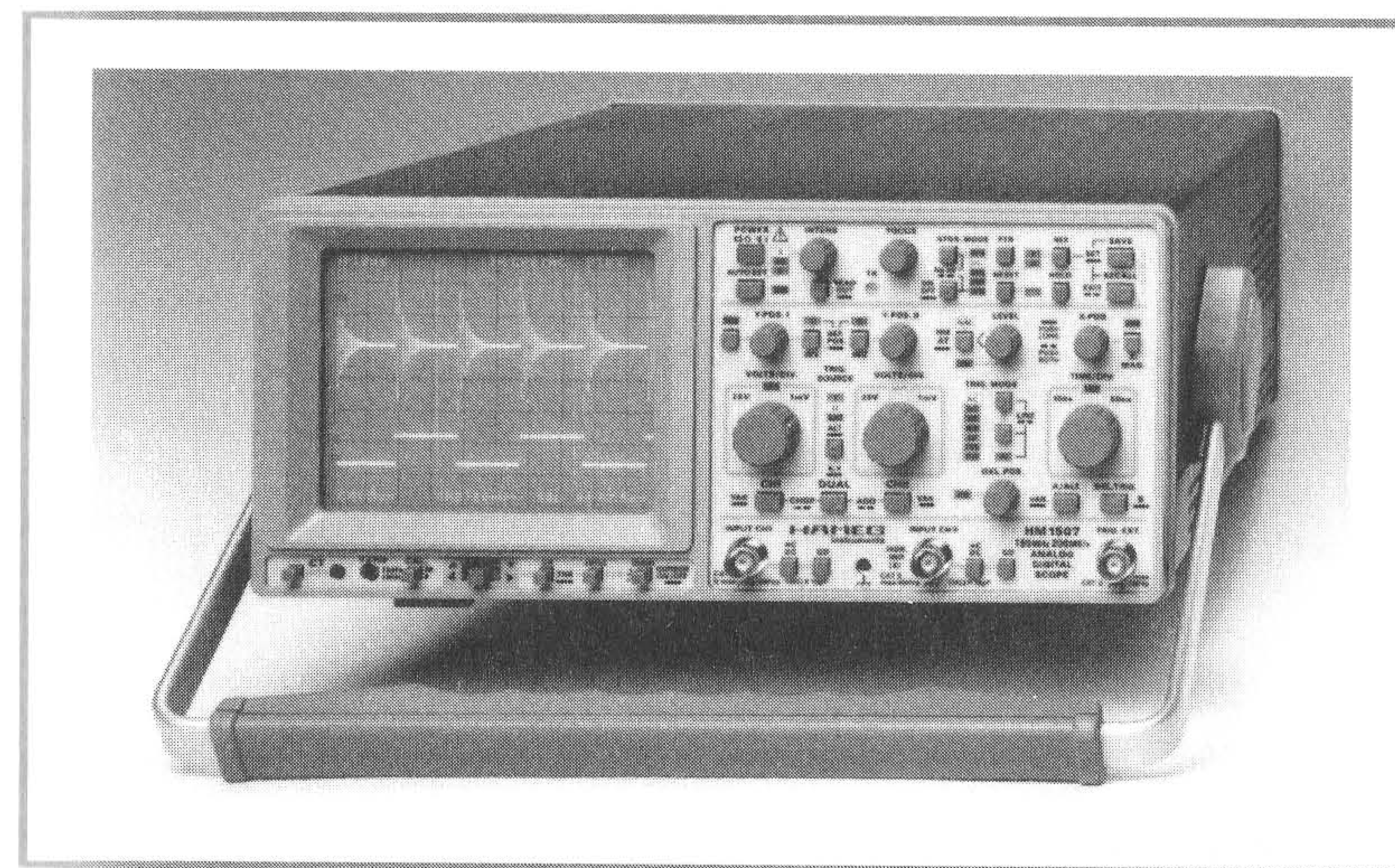


Figure 2.5 – Oscilloscope numérique HM1507 (document Hameg Instruments).

Cartes d'acquisition

L'ordinateur étant de plus en plus souvent utilisé pour traiter les informations issues de mesures, il est possible d'utiliser diverses cartes d'acquisition dans lesquelles on retrouve les mêmes fonctions de numérisation du signal que dans un oscilloscope numérique,

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

mais qui ne possèdent pas d'écran et de boutons de réglage et qui ne sont donc pas utilisables de façon autonome.

Branchement de l'appareil

Les oscilloscopes courants ont deux voies, c'est-à-dire qu'il est possible de visualiser simultanément deux tensions. Il faut toutefois faire attention au fait que les tensions représentées doivent avoir un point à la masse. En effet, les deux voies comportent chacune une borne reliée à la masse métallique de l'appareil qui est elle-même connectée à la terre par l'intermédiaire de la prise secteur. Les prises d'entrée sont du type BNC. Elles sont prévues pour utiliser des liaisons en câble coaxial. Des adaptateurs permettent éventuellement de revenir à des liaisons bifilaires, mais il est préférable d'utiliser un câble coaxial avec une extrémité BNC et une extrémité en fiche banane. On peut également employer des sondes. La sonde directe n'est qu'un câble coaxial muni d'une pointe de touche ou d'une pince, mais la sonde atténuatrice (× 10 ou × 100) peut se compenser, ce qui permet de ne pas perturber le montage grâce à une capacité parasite très réduite.

Pour mesurer une tension entre deux points placés à des potentiels différents de celui de la masse, il est possible de faire appel à une sonde différentielle qui transforme la tension à mesurer en un signal identique ayant une référence à la masse pour être appliqué à l'entrée de l'oscilloscope.

Description des commandes

La face avant d'un oscilloscope se présente toujours à peu près de la même manière, quel que soit le modèle. Prenons l'exemple du modèle *Hameg Instruments* HM303-5.

En dessous de l'écran apparaît un picot qui délivre un signal carré de fréquence et d'amplitude fixées : il est utilisé pour la compensation des sondes atténuatrices. En haut de la face de l'appareil, on trouve le bouton marche-arrêt (POWER) et à sa droite deux potentiomètres qui permettent de régler la qualité de l'image obtenue : l'intensité lumineuse (INTENS) et la focalisation (FOCUS).

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

En dessous, à gauche, les deux voies de l'appareil sont identiques. On y remarque les prises BNC où seront reliées les tensions à visualiser, et à leur droite deux boutons poussoirs. Le premier permet de choisir le couplage des entrées. La position DC donne un couplage continu entre la borne d'accès et l'amplificateur, on observe donc directement la tension appliquée à l'appareil : c'est la position utilisée normalement en fonctionnement. La position AC donne, elle, un couplage alternatif, en intercalant un condensateur de liaison dans l'entrée. La composante continue est ainsi coupée tandis que la composante alternative est transmise. Toutefois, la transmission n'est correcte que si la fréquence n'est pas trop basse (elle doit être supérieure à quelques dizaines de hertz). On observe alors uniquement l'ondulation du signal. Le deuxième poussoir GD (*ground*) permet de relier l'entrée de l'amplificateur à la masse, ce qui donne le réglage de zéro de la trace sur l'écran. Un troisième poussoir (INV) est présent pour la voie 1 afin d'inverser éventuellement le signe de la tension. Le vernier VOLTS/DIV permet de régler les calibres pour les tensions qui seront lues sur l'axe vertical de l'écran. La partie supérieure du bouton donne un réglage continu entre les calibres indiqués. Il faut veiller à ce que les verniers soient en position calibrée (CAL) si l'on veut utiliser leur étalonnage pour lire une tension. Un bouton (Y POS) fait se déplacer la courbe sur l'écran vers le haut ou vers le bas. Un bouton poussoir (ADD) permet d'afficher la somme des tensions appliquées sur les deux voies. La commande XY donne une courbe représentant une voie en fonction de l'autre.

Il y a ensuite plus à droite la base de temps : celle-ci fournit le balayage de l'axe horizontal, c'est-à-dire le déplacement du spot de gauche à droite puis son retour rapide au point de départ, et ceci périodiquement. Le vernier central (TIME/DIV) permet de choisir la vitesse de balayage (en fonction de la rapidité des signaux à observer). Comme pour les verniers des voies 1 et 2, on dispose de positions étalonnées et d'un réglage continu par le bouton situé au dessus. Le réglage du niveau de synchronisation (LEVEL) permet une stabilisation de la trace visible sur l'écran en faisant en sorte que chaque balayage démarre au même niveau de signal pour qu'il y ait à chaque fois recouvrement du précédent, et un bouton poussoir (SLOPE) donne le

choix du front sur lequel se produit la synchronisation : front montant ou front descendant. Un bouton (X POS) règle la position de la courbe sur l'axe horizontal : on peut ainsi déplacer la trace à droite ou à gauche. En bas à droite, une troisième prise BNC associée à un poussoir (TRIGGER EXTERN) autorise la synchronisation sur un signal différent de celui qui est appliqué aux deux voies.

Performances

Le principal paramètre de choix d'un oscilloscope est sa bande passante. Un appareil est en effet limité pour la rapidité des signaux que l'on peut observer. Il faut prendre garde au fait que la bande passante se définit en régime sinusoïdal et que la limite de fréquence pour un signal quelconque lui est bien inférieure.

Pour un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition, c'est la fréquence d'échantillonnage qui est déterminante : plus elle est élevée, plus on peut espérer visualiser avec précision des signaux rapides.

Mode d'emploi

Pour utiliser un oscilloscope, on commence, après la mise en marche, à rechercher la trace (qui existe en l'absence de signal appliqué, à condition que le déclenchement soit automatique) si elle n'apparaît pas immédiatement sur l'écran. Pour cela, on agit sur les boutons de position horizontale et verticale ainsi que sur la commande de luminosité. Si nécessaire, on règle la focalisation pour avoir une trace bien nette. Toutefois, ces réglages n'ont pas à être retouchés très souvent. On branche ensuite l'appareil sur le montage. On utilise normalement le couplage continu et on choisit le calibre de tension pour avoir toute la hauteur de la courbe sur l'écran. On règle le zéro en mettant l'entrée à la masse par le commutateur de couplage. Ce zéro sera choisi sur une ligne du réticule (quadrillage de l'écran). Suivant le signal à observer, on place le zéro au milieu de l'écran, ou en bas, ou en haut. Ensuite, il faut stabiliser la courbe en synchronisant correctement le signal. Après avoir choisi un déclenchement interne (cas le plus fréquent) ou externe, on règle le niveau de déclenchement pour obtenir une trace

bien stable. La base de temps doit permettre d'observer quelques périodes du signal sur la largeur de l'écran. Certains appareils possèdent une fonction de réglage automatique (AUTOSET) qui permet d'avoir rapidement une visualisation du signal sur l'écran : cela ne dispense toutefois pas d'un réglage manuel pour une meilleure adaptation à ce que l'on veut mesurer.

L'oscilloscope donne tout d'abord l'aspect des variations d'une tension, mais il peut également servir à la mesure d'un certain nombre de grandeurs caractéristiques. L'étalonnage des voies A et B permet la mesure des tensions. Pour obtenir la valeur d'un niveau continu, on règle le zéro sur une ligne déterminée, le commutateur de couplage étant sur la position « masse », puis on passe en position de couplage continu : il suffit alors de compter le nombre de divisions du réticule entre les deux traces et de faire la conversion en volts compte tenu du calibre de la voie utilisée. Prenons l'exemple de la *figure 2.6*.

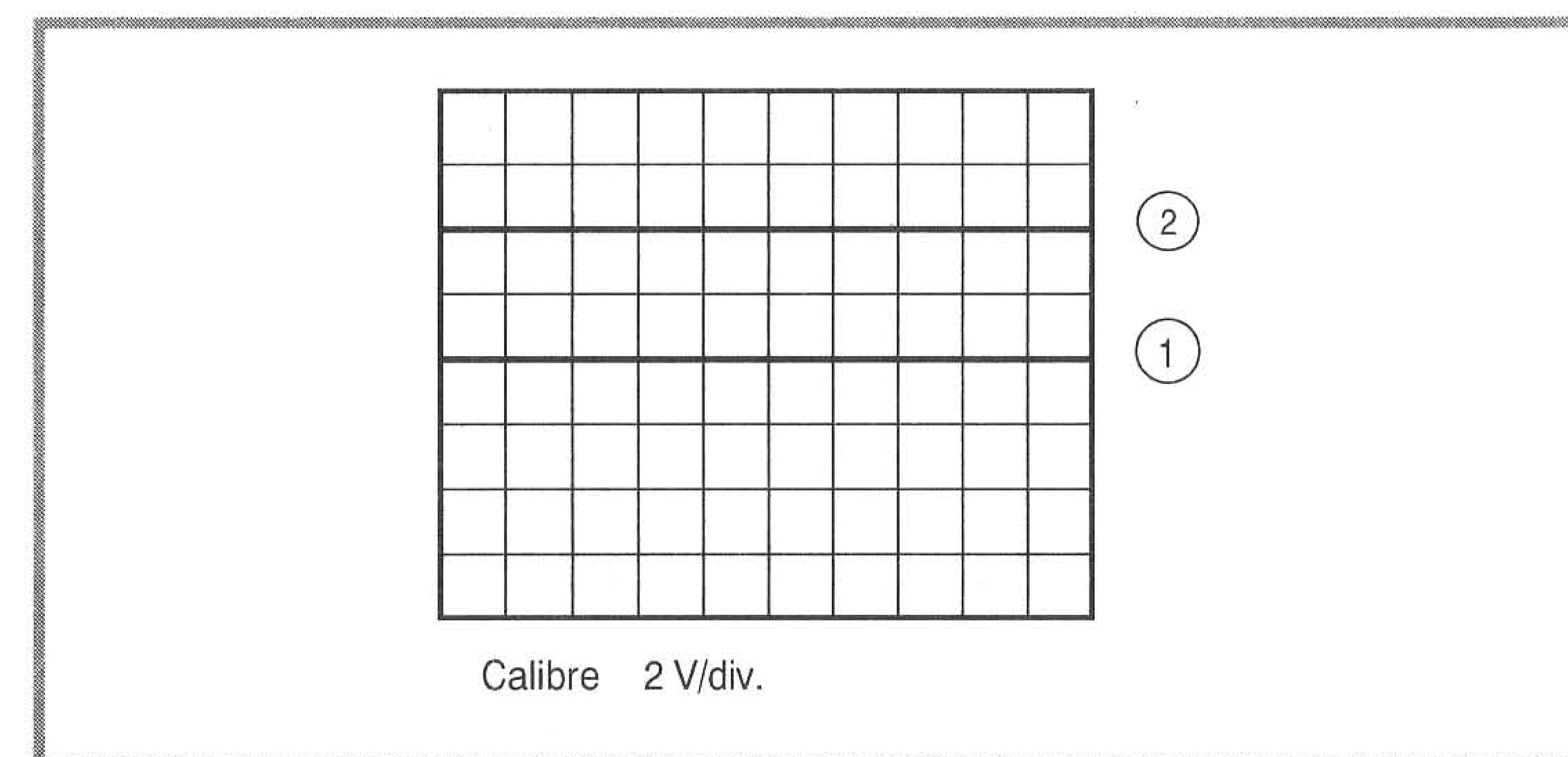


Figure 2.6 – Mesure d'une tension continue.
① Trace obtenue avec le commutateur de couplage sur GD
② Trace obtenue avec le commutateur de couplage sur DC.

On lit un écart de 2 carreaux, avec un calibre de 2 V par division. La tension continue vaut ainsi :

$$2 \times 2 = 4\ \text{V}$$

On peut aussi mesurer l'amplitude d'un signal alternatif. On lit la valeur crête-à-crête et on en déduit l'amplitude en divisant par 2. Le réglage de zéro n'a aucune importance. Prenons l'exemple de la *figure 2.7*.

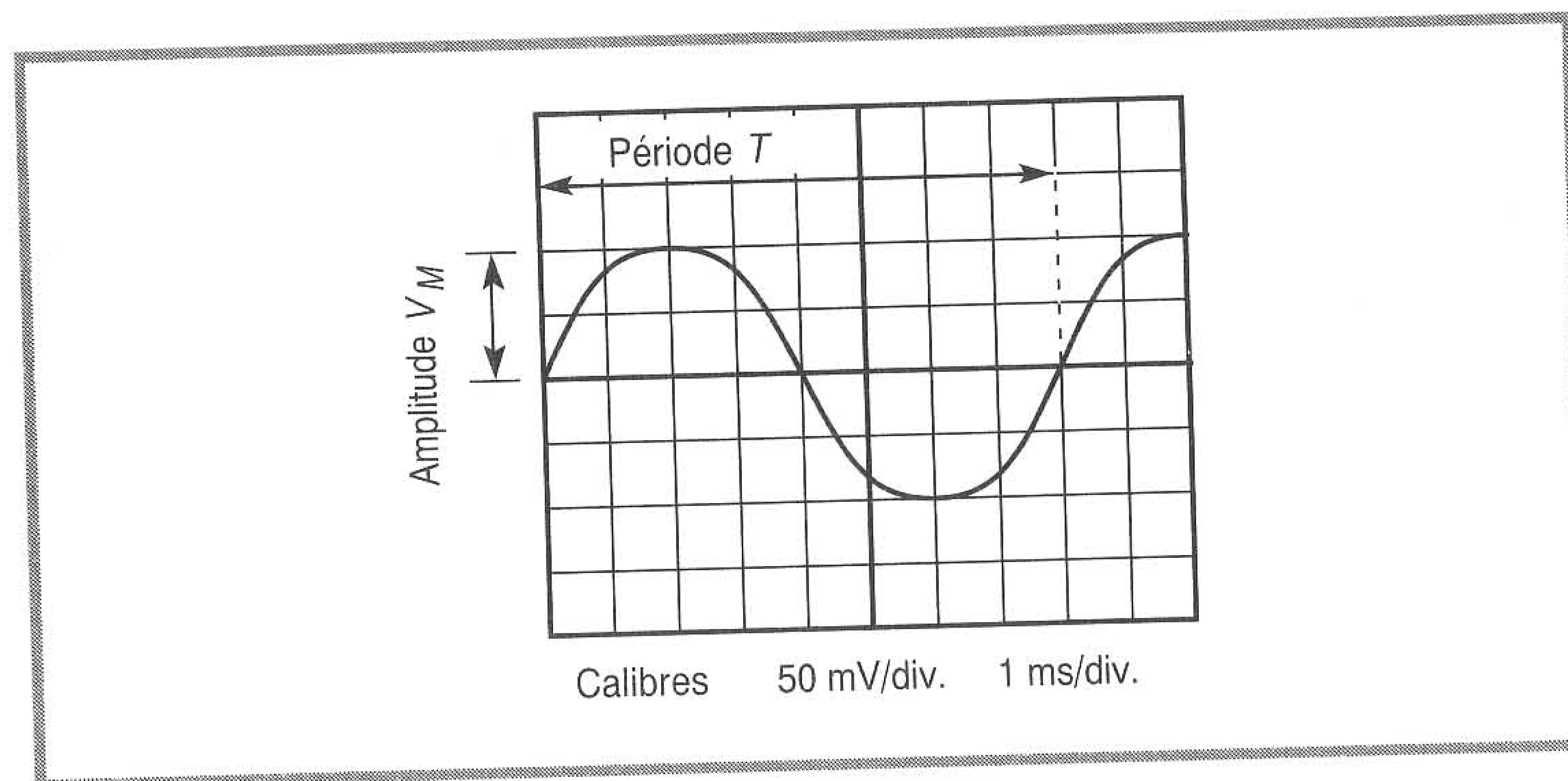


Figure 2.7 – Mesure de l'amplitude d'une tension alternative.

On a 4 carreaux crête-à-crête, donc 2 carreaux pour l'amplitude. Avec un calibre de 50 mV par division, la valeur de l'amplitude est :

$$V_M = 2 \times 50 = 100 \text{ mV}$$

Si le signal est sinusoïdal, la valeur efficace (c'est celle qui est donnée par un voltmètre) est obtenue en divisant l'amplitude par $\sqrt{2}$, c'est-à-dire pour simplifier en la multipliant par 0,7. Ainsi la tension efficace est pour notre exemple :

$$V_{eff} = 0{,}7 \times 100 = 70 \text{ mV}$$

L'étalonnage de la base de temps rend possible la mesure des durées et en particulier la détermination de la période d'un signal et donc de sa fréquence, en prenant l'inverse :

$$f = \frac{1}{T}$$

Reprenons l'exemple précédent (*figure 2.7*). Une période occupe 8 carreaux. Avec une base de temps de 1 ms par division, cela donne :

$$T = 8 \times 1 = 8 \text{ ms}$$

et par conséquent la fréquence est :

$$f = \frac{1}{8} = 0{,}125 \text{ kHz} \quad (125 \text{ Hz})$$

On peut aussi mesurer le décalage dans le temps (retard ou avance) entre deux signaux. On préfère dans ce cas parler de déphasage en exprimant ce décalage en degrés. Il suffit alors de considérer qu'une période T pour le temps correspond à 360° pour l'angle. Les deux signaux considérés sont appliqués aux voies 1 et 2 de l'oscilloscope, les calibres sont choisis de façon que les sinusoïdes aient une grande amplitude sur l'écran, et on lit le décalage sur l'axe horizontal en le graduant en degrés.

Il est commode de faire correspondre une division à un nombre simple de degrés. Pour cela, par exemple, une demi-période est étalée sur 9 carreaux, ce qui donne une échelle de 20° par division. Il suffit d'utiliser le réglage continu de la base de temps (position non étalonnée), ce qui n'est pas gênant ici puisque l'on n'utilise pas la valeur des calibres de temps.

Quand on détermine le décalage en prenant les passages des sinusoïdes par zéro, il faut au préalable soigneusement régler le zéro des deux courbes sur la même ligne. Prenons l'exemple de la *figure 2.8*. La demi-période a bien été étalée sur 9 carreaux, le zéro a été réglé sur la ligne centrale et on lit un écart de 3 carreaux entre les deux signaux. Le déphasage est donc :

$$3 \times 20 = 60°$$

D'autres utilisations sont encore possibles pour l'oscilloscope qui est vraiment l'appareil universel de l'électronicien. De nombreux modèles présentent des perfectionnements qui étendent les possibilités d'emploi et facilitent l'utilisation.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

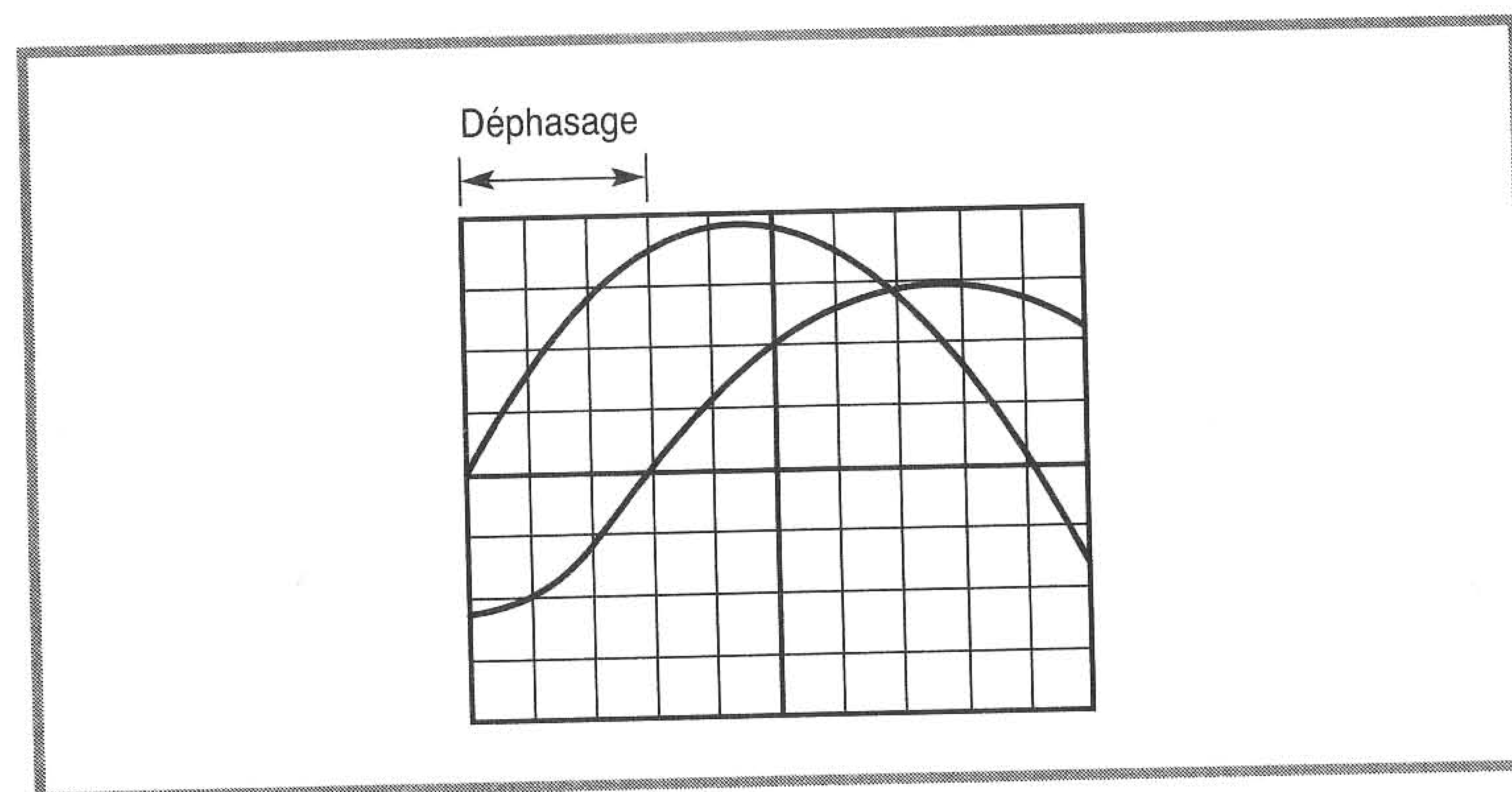


Figure 2.8 – Mesure de déphasage.

2.3 Alimentation continue

Les montages électroniques, sauf rares exceptions, demandent une certaine énergie pour fonctionner. Celle-ci est fournie par un générateur de tension continue : l'alimentation. Dans une réalisation, l'alimentation se fait soit par piles, soit par un montage électronique branché sur le secteur. Toutefois, au laboratoire, on commence par concevoir et expérimenter le circuit sans son alimentation qui ne sera réalisée que dans la phase finale, mais en la remplaçant par une source de tension externe. On utilise pour cela des appareils qui délivrent une tension continue bien stable : ce sont les alimentations régulées (*figure 2.9*).

Ces générateurs possèdent un réglage de la tension entre 0 et une valeur maximale. Ils sont munis d'une limitation interne du courant. Les modèles les plus élaborés peuvent fonctionner en régulation de courant : ils délivrent alors un courant constant au lieu d'une tension constante. Cette dernière possibilité est intéressante pour quelques mesures. Certaines alimentations ont plusieurs sorties, variables ou fixes. Pour les essais courants au laboratoire, une alimentation double réglable 40 V ; 1 A est bien suffisante. Ce genre d'appareil peut assez facilement être fabriqué à un prix abordable : les nombreux schémas

proposés par les revues d'électronique donnent parfaitement satisfaction et ne demandent que peu de mise au point. Le principe utilisé par toutes ces réalisations est détaillé au chapitre 6.

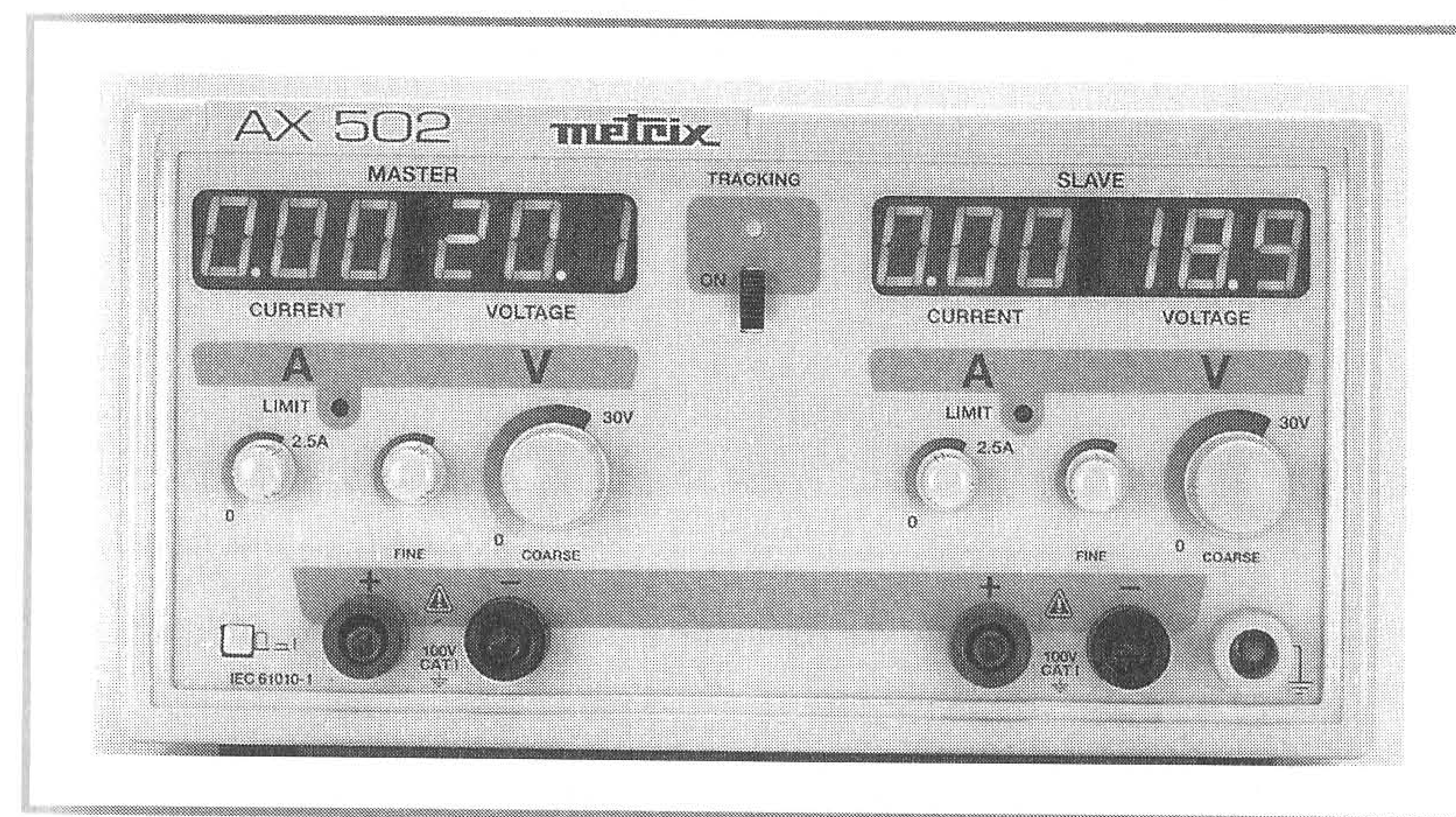


Figure 2.9 – Alimentation régulée AX502 (document Metrix).

2.4 Générateurs de signaux

Pour l'essai des montages, on applique à leur entrée des signaux particuliers qui permettent de chiffrer leurs performances. On utilise principalement le continu, le sinusoïdal, le carré et le triangulaire. Un générateur externe délivre ces signaux.

L'appareil le plus simple est le générateur basse fréquence (BF) qui fournit une tension sinusoïdale d'amplitude et de fréquence réglables, ainsi qu'en général du carré. Il s'agit simplement d'un oscillateur sinusoïdal dont le principe est expliqué au chapitre 9.

Sauf pour les modèles très bon marché et pour certains domaines spécifiques, cet appareil est aujourd'hui remplacé par le générateur de fonctions qui offre de nombreuses possibilités supplémentaires (*figure 2.10*).

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

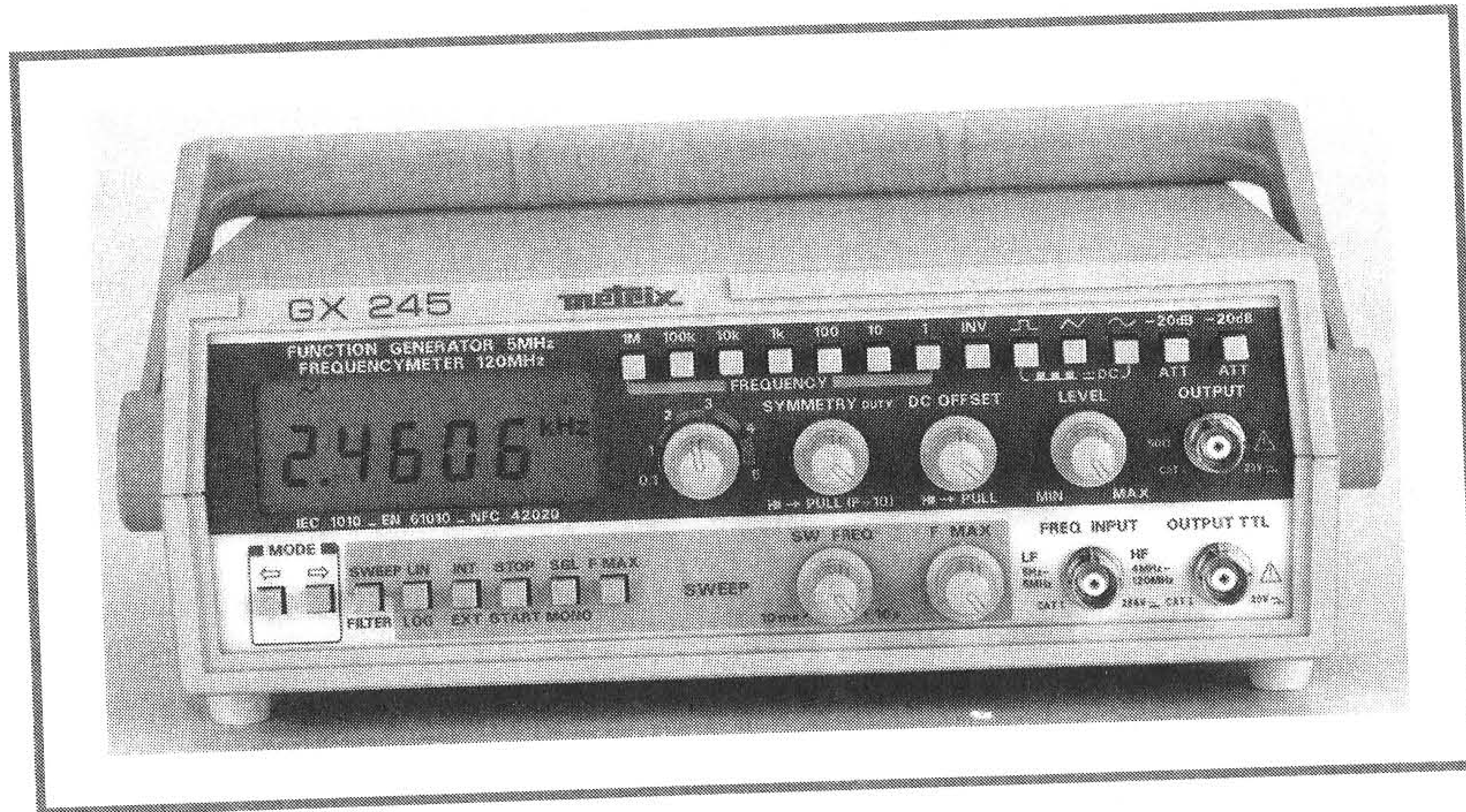


Figure 2.10 – Générateur de fonctions GX245 (document Metrix).

Cet appareil délivre des tensions continues, carrées, triangulaires et sinusoïdales. La fréquence peut varier dans une vaste plage (jusqu'à 5 MHz pour le modèle représenté), l'amplitude est réglable ainsi que la composante continue qui peut être ajoutée aux diverses formes de tensions (*offset*). Suivant les appareils, on peut aussi régler le rapport cyclique (c'est-à-dire obtenir un signal carré pour lequel la durée de l'état haut est différente de la durée de l'état bas), commander la fréquence par une tension externe ou interne (wobulation), moduler les signaux de sortie, etc. De nombreux modèles disposent d'un affichage numérique de la fréquence.

CHAPITRE 3

AMPLIFICATEUR DE TENSION À CIRCUIT INTÉGRÉ

L'amplification est l'opération qui consiste à multiplier une tension par un nombre donné. Cette fonction est nécessaire à chaque fois qu'un signal est trop faible pour être utilisé tel quel. C'est par exemple le cas de nombreux capteurs qui délivrent une faible tension image de la grandeur détectée.

3.1 Description du schéma et choix des composants

On peut réaliser un amplificateur très simple avec un circuit intégré et deux résistances. Le schéma est donné à la *figure 3.1*.

Le circuit intégré est un amplificateur opérationnel. Ce composant très bon marché permet de réaliser de nombreux montages dans des domaines variés de l'électronique. Il se présente en général sous forme d'un boîtier plastique possédant une double rangée de connexions (DIL, *dual in line* dans les notices en anglais). Les modèles simples habituellement utilisés ont tous le même brochage, bien que les références soient très nombreuses. Cette disposition des connexions est représentée à la *figure 3.2*, en vue de dessus comme le veut l'habitude pour les circuits intégrés. Il faut faire attention au sens du boîtier qui est indiqué par une encoche ou un point en relief qui doit se trouver en haut. Le modèle retenu pour la réalisation est le plus classique et le plus courant des amplificateurs opérationnels, le 741. Ce circuit est commercialisé par la plupart des constructeurs sous des références un peu différentes : LM 741, UA 741, MC 1741... On peut employer dans ce montage n'importe quel autre amplificateur opérationnel,

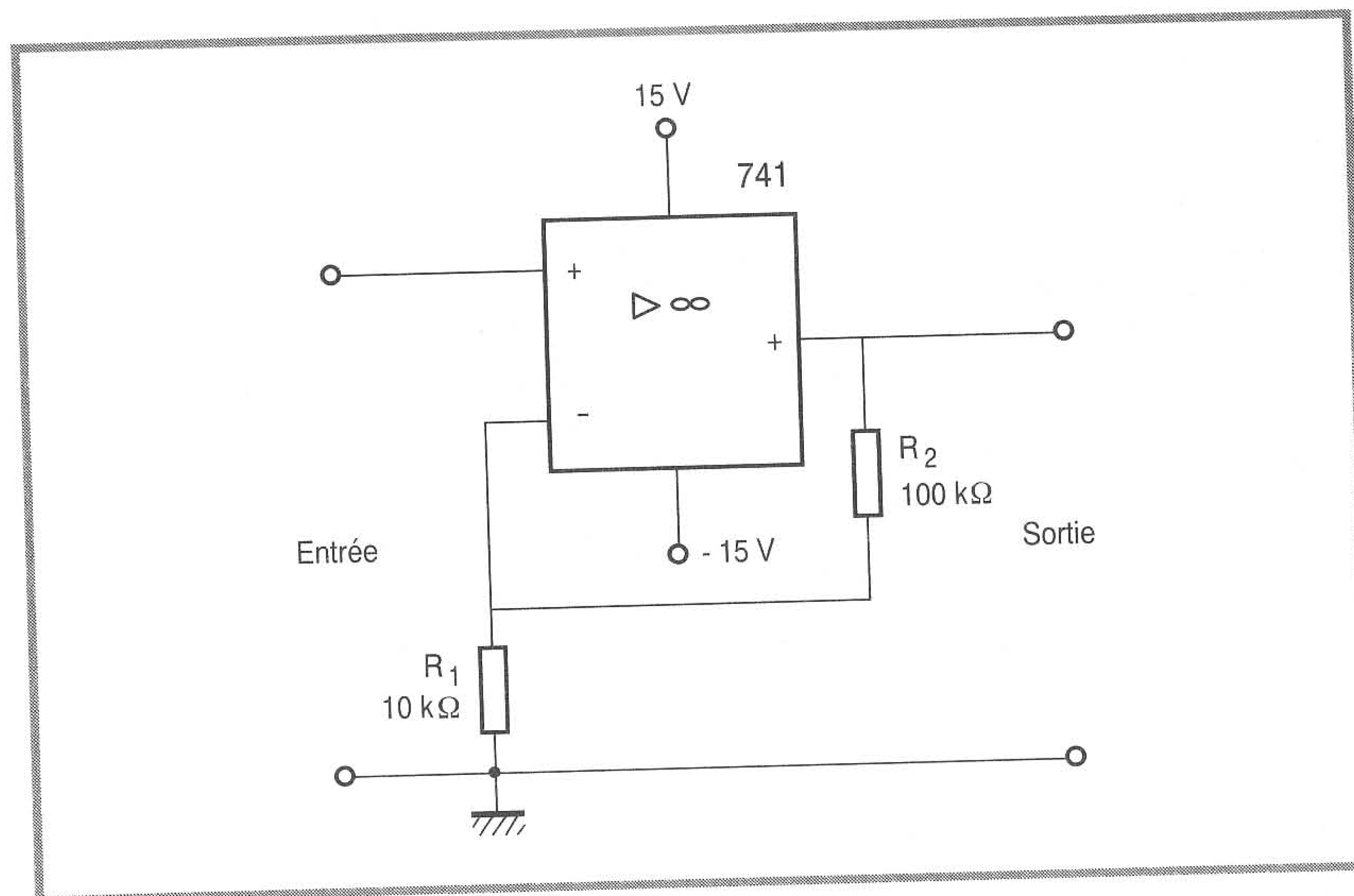


Figure 3.1 – Schéma de l'amplificateur de tension.

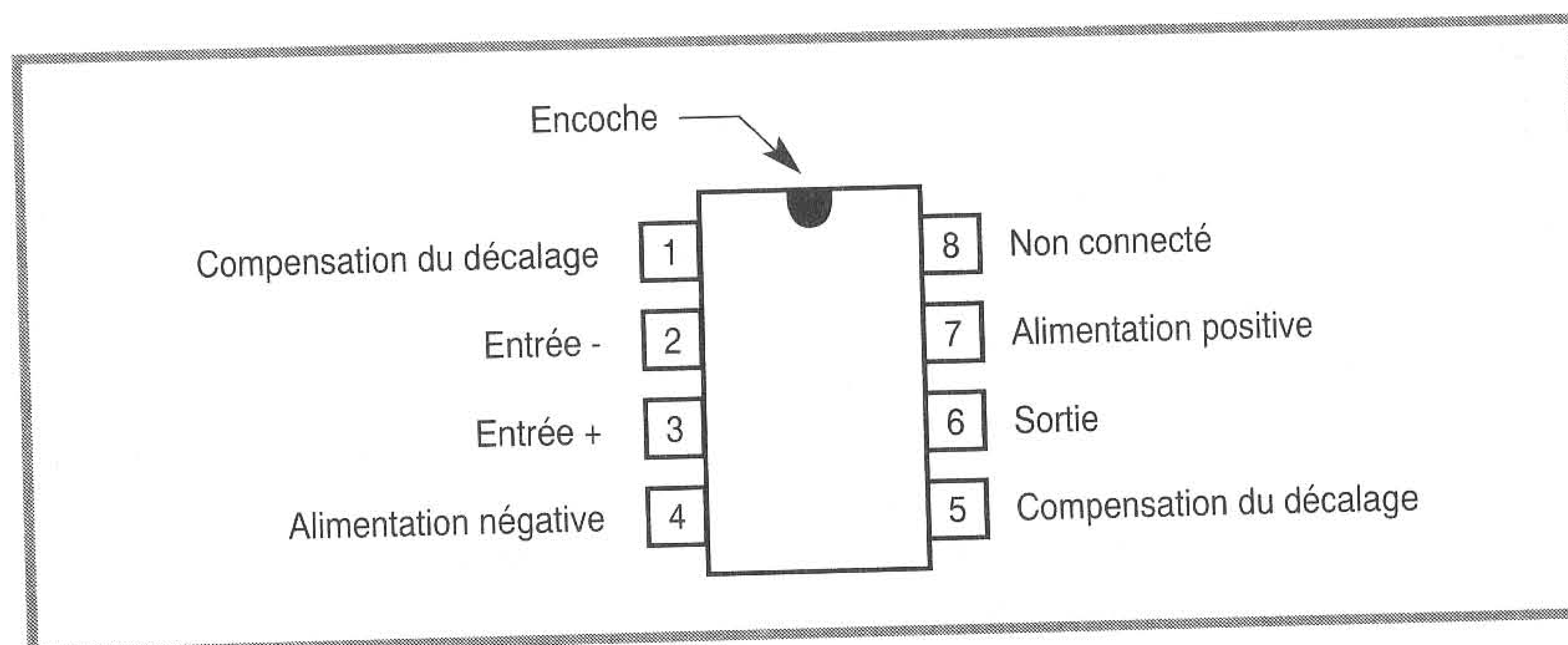


Figure 3.2 – Brochage des amplificateurs opérationnels simples (comme le 741). Vue de dessus.

seules les limites d'utilisation seront modifiées (elles seront en général améliorées par rapport à celles obtenues avec un 741).

Pour fonctionner, l'amplificateur opérationnel doit être alimenté par deux générateurs de tension continue comme l'indique la *figure 3.3*.

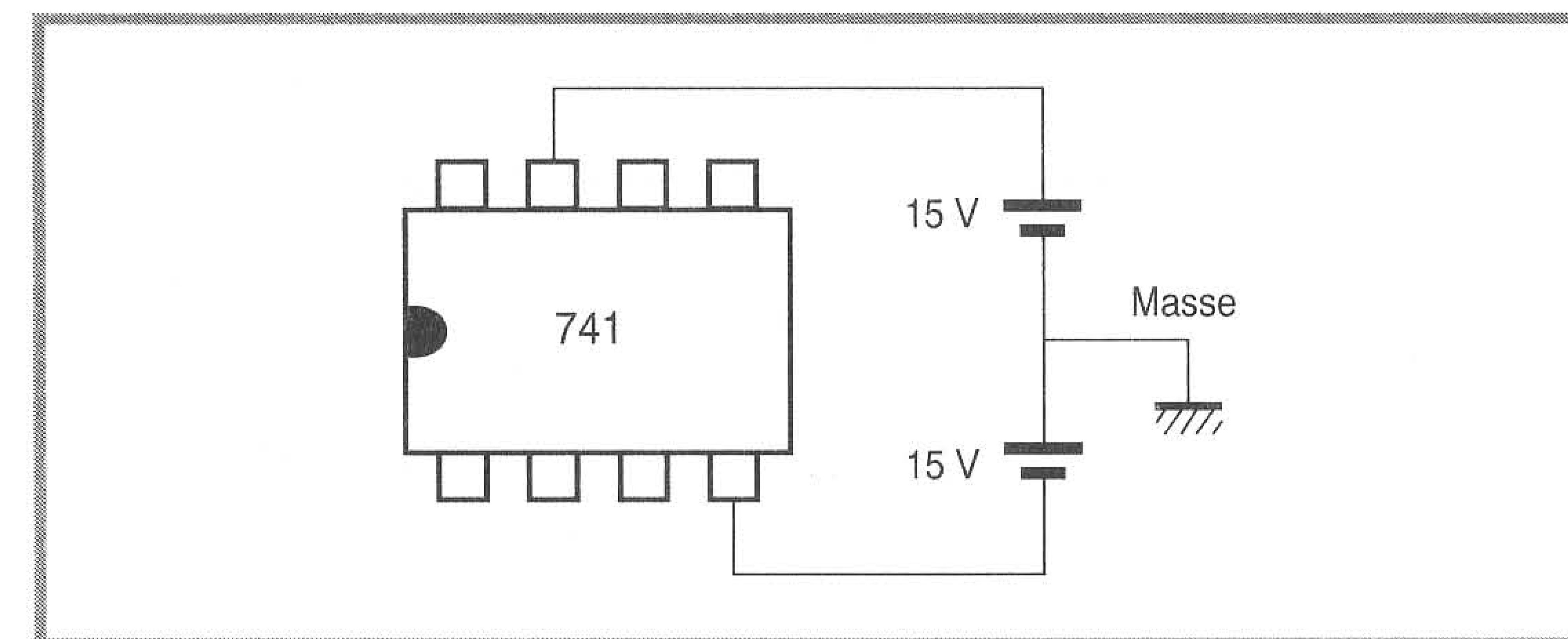


Figure 3.3 – Alimentation du circuit intégré.

Le point commun aux deux alimentations est la masse du montage. Il n'est pas prévu de connexion correspondante sur le circuit intégré, mais les points repérés comme masse dans les schémas doivent toujours être reliés à ce commun des alimentations. Les valeurs des tensions d'alimentation doivent être inférieures à 18 V (c'est une limite absolue pour le composant). Une valeur souvent utilisée est 15 V, mais le choix dépend de l'usage de l'amplificateur car le fonctionnement du montage ne sera correct que si la tension de sortie reste inférieure de 1 à 2 V à l'alimentation. On choisira donc une alimentation supérieure de 2 V à la valeur maximale désirée pour le signal de sortie. Sur les schémas des montages, on omet souvent les liaisons nécessaires à l'alimentation des circuits intégrés, pourtant indispensables.

La représentation normalisée d'un amplificateur opérationnel est précisée à la *figure 3.4* ; une autre représentation souvent utilisée est donnée à la *figure 3.5*. Les bornes situées à gauche du schéma et repérées + et – sont les entrées de l'amplificateur opérationnel et correspondent respectivement aux pattes 3 et 2 du brochage (attention à

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

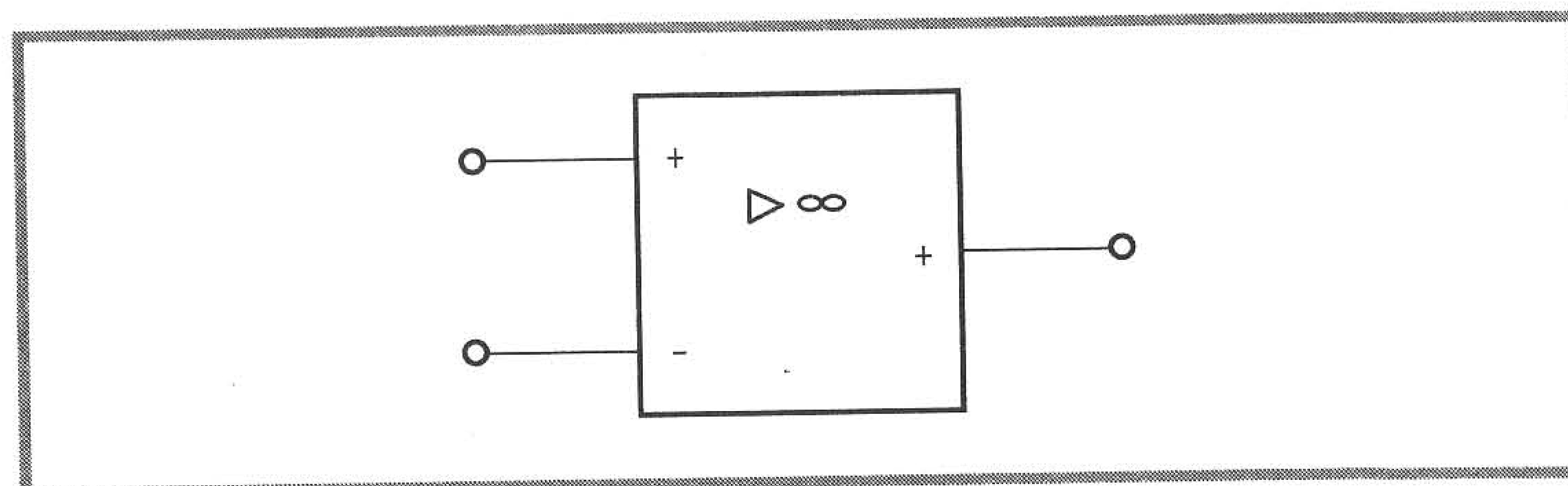


Figure 3.4 – Symbole normalisé de l'amplificateur opérationnel.

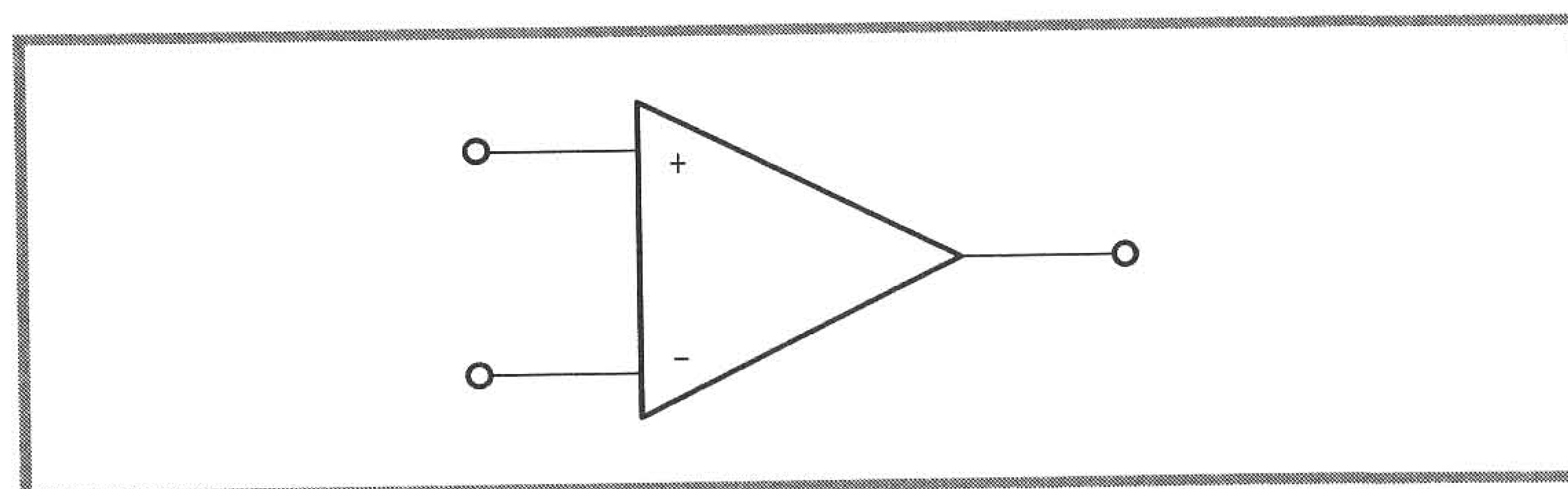


Figure 3.5 – Autre symbole courant de l'amplificateur opérationnel.

respecter la correspondance : les deux entrées ne sont pas interchangeables). La borne située à droite du symbole est la sortie et correspond à la broche 6. Pour réaliser le montage, il suffit d'effectuer les liaisons indiquées par la *figure 3.1* en prenant garde de ne pas oublier les connexions d'alimentation et la liaison entre la masse et le commun des générateurs continus. Les bornes 1 et 5 dénommées « compensation du décalage » ne seront pas utilisées pour l'instant et on peut les laisser en l'air.

Les résistances R_1 et R_2 permettent de fixer l'amplification du montage, c'est-à-dire le rapport entre la tension de sortie v_S et la tension d'entrée v_E :

$$A = \frac{v_S}{v_E}$$

Pour le schéma choisi, l'amplification A est donnée par la formule :

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Avec les valeurs indiquées sur la *figure 3.1*, on obtient :

$$A = 1 + \frac{100}{10} = 11$$

3.2 Vérification du fonctionnement

Le montage étant câblé, on branche le générateur de fonctions à l'entrée pour créer le signal à amplifier. On place une voie de l'oscilloscope sur l'entrée et l'autre voie sur la sortie comme le montre la *figure 3.6*.

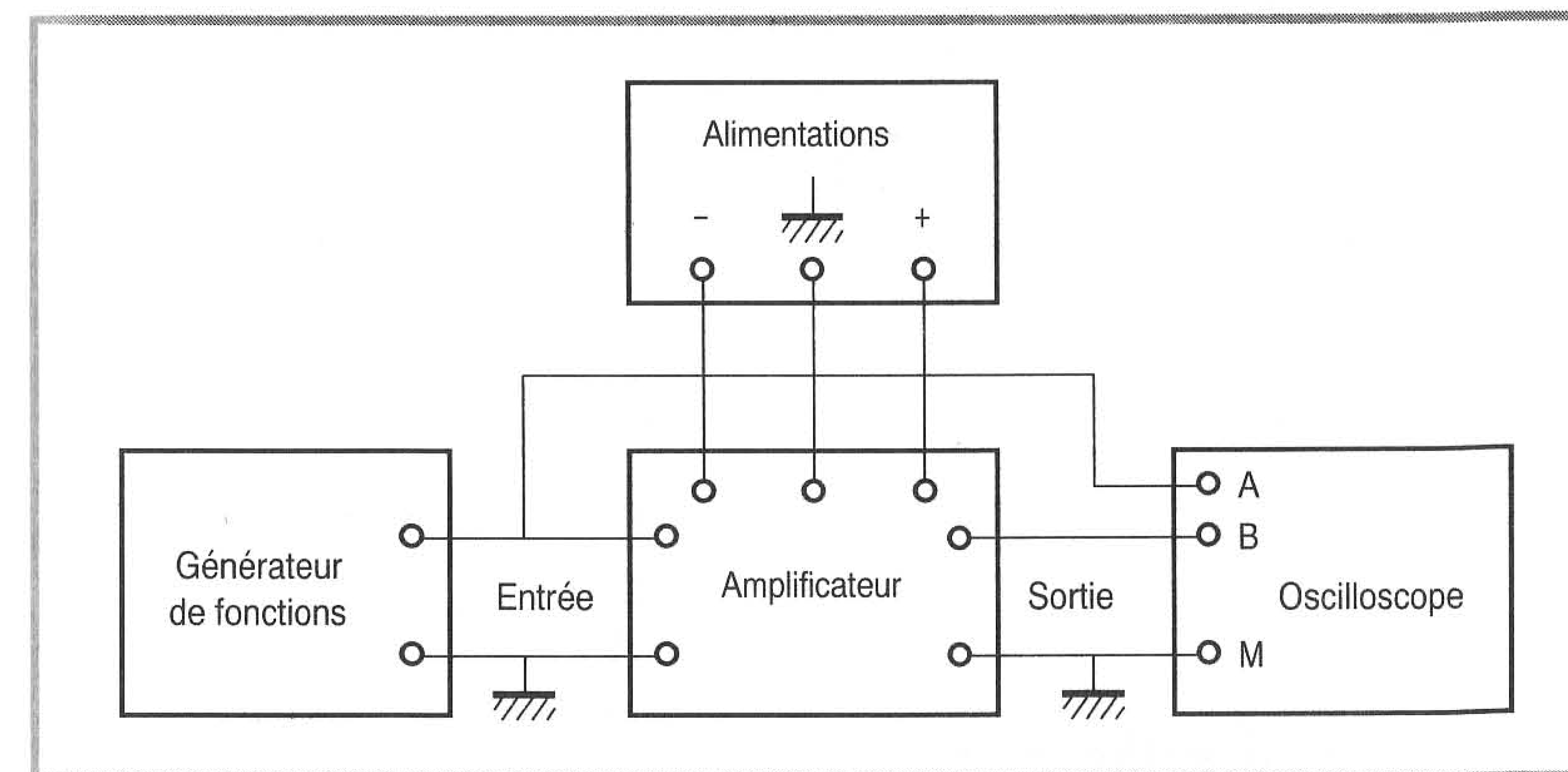


Figure 3.6 – Branchement des appareils nécessaires à l'expérimentation de l'amplificateur.

On commence par mettre en marche les alimentations que l'on règle à 15 V avant d'allumer le générateur de fonctions. Un circuit doit en

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

effet être alimenté avant de recevoir un signal sur ses entrées. Le générateur est réglé pour fournir une tension sinusoïdale d'amplitude 0,5 V et de fréquence 1 kHz (*figure 3.7*). On observe alors en sortie un signal de même forme, de même fréquence mais dont l'amplitude est d'environ 5,5 V. On a donc bien réalisé un amplificateur. En faisant le quotient de l'amplitude de la tension de sortie par l'amplitude de la tension d'entrée, on obtient l'amplification A du montage. Ce résultat sera en général légèrement différent de la valeur 11 qui avait été prévue. Cet écart est simplement dû à la tolérance des résistances. Pour déterminer à l'avance le nombre exact, il suffit de mesurer les résistances R_1 et R_2 à l'ohmmètre (quand elles sont débranchées du montage) et de refaire le calcul de A avec ces valeurs réelles. On peut également vérifier le fonctionnement de l'amplificateur avec d'autres formes de signaux comme le triangulaire et avec d'autres valeurs pour l'amplitude et la fréquence, à condition de rester dans certaines limites qui sont précisées par la suite.

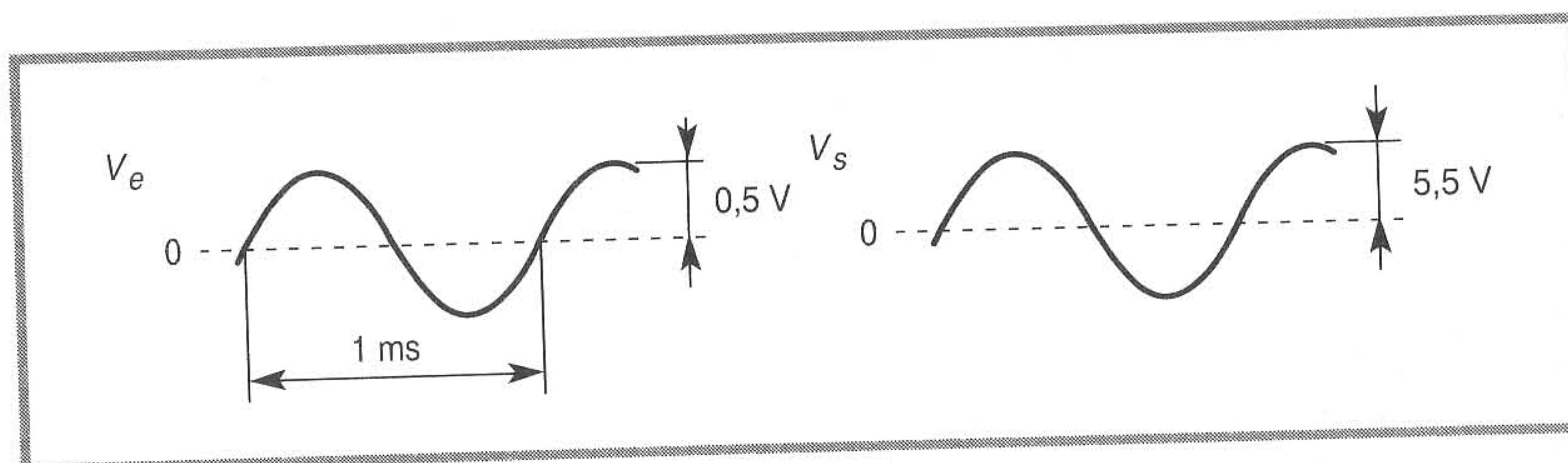


Figure 3.7 – Tensions d'entrée et de sortie de l'amplificateur.

3.3 Limites d'utilisation

Tension maximale

À partir d'un fonctionnement correct tel qu'il a été décrit dans le paragraphe précédent (tension d'entrée sinusoïdale de fréquence 1 kHz et d'amplitude 0,5 V), on augmente progressivement l'amplitude de la

tension d'entrée. On constate d'abord que l'amplitude de la tension de sortie croît de la même façon, ce qui est normal puisqu'on a :

$$v_S = A\, v_E$$

Toutefois, on observe qu'à partir d'un certain niveau, le signal de sortie se déforme : il apparaît un écrêtage comme le montre la *figure 3.8*. L'amplificateur ne fonctionne plus correctement, il est saturé.

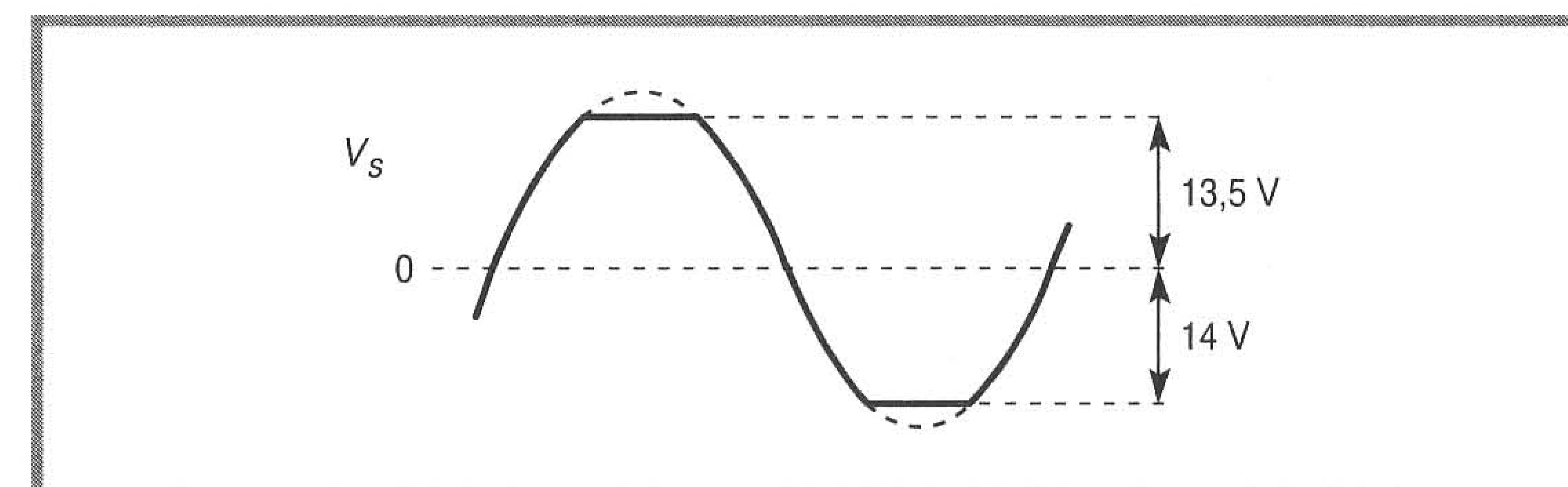


Figure 3.8 – Écrêtage de la tension de sortie dû à la saturation de l'amplificateur opérationnel.

Les niveaux d'écrêtage sont les tensions de saturation de l'amplificateur opérationnel. Ces deux valeurs sont voisines des tensions d'alimentation, l'écart avec ces dernières dépendant un peu de l'amplificateur opérationnel choisi. On peut par exemple avoir avec des alimentations – 15 V et 15 V, des tensions de saturation de – 14 V et 13,5 V. L'amplitude du signal de sortie doit rester inférieure à 13,5 V. On en déduit la valeur limite de la tension d'entrée en divisant par l'amplification A. On obtient ici :

$$(V_{EM})_{max} = \frac{13{,}5}{11} \approx 1{,}23 \text{ V}$$

On peut également bien observer ce phénomène en utilisant l'oscilloscope en XY : on applique la tension d'entrée en X (déviation horizontale) et la tension de sortie en Y (déviation verticale). On obtient une courbe identique à celle qui est représentée à la *figure 3.9*.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Trois domaines y apparaissent : le domaine linéaire (bon fonctionnement en amplificateur) et les deux domaines de saturation où la tension de sortie reste constante (écrêtage).

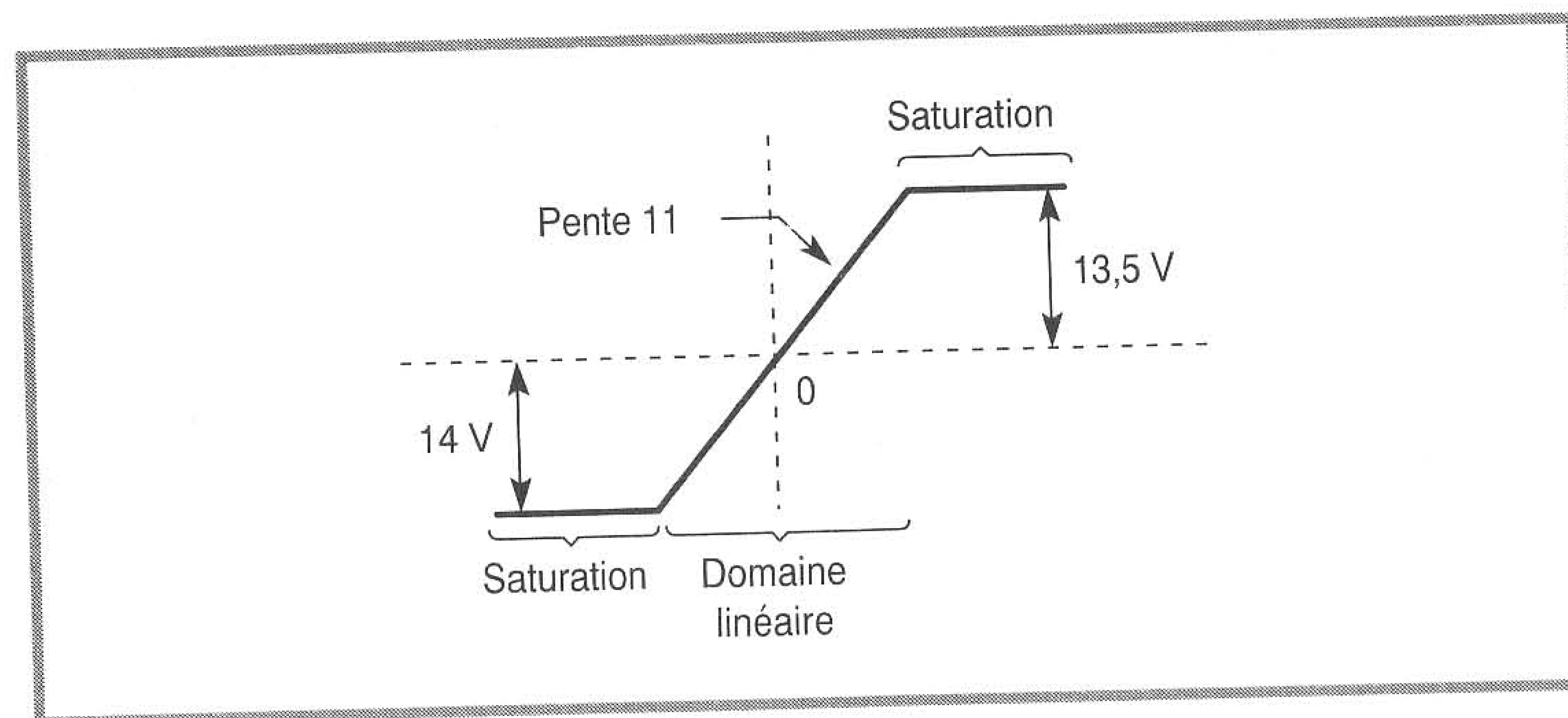


Figure 3.9 – Observation de la saturation de l'amplificateur sur l'oscilloscope en XY.

Courant maximal

Lorsqu'on utilise l'amplificateur, on connecte ses bornes de sortie à une charge qui peut être une simple résistance ou l'entrée d'un autre montage. Les deux cas sont similaires car l'entrée de beaucoup de montages se comporte comme une résistance, tout au moins dans le domaine utilisé ici.

Pour étudier l'influence d'une charge sur le fonctionnement de l'amplificateur, on place une résistance entre les bornes de sortie. On observe alors la forme de la tension de sortie sur l'écran de l'oscilloscope. On commence par utiliser une résistance de charge de valeur élevée, 100 kΩ par exemple. Aucun changement n'apparaît par rapport au fonctionnement à vide (sans charge). On remplace ensuite la résistance par une autre de valeur plus faible, 10 kΩ par exemple. Toujours pas de changement. On continue ainsi à diminuer la résistance. À partir d'une certaine valeur (de l'ordre de 200 à 250 Ω), on observe un écrêtage de la tension de sortie à un niveau inférieur à la

tension de saturation. Ce phénomène est dû à la limitation de courant de l'amplificateur opérationnel. Lorsqu'on diminue la résistance de charge, le courant que doit fournir le circuit intégré augmente et à un certain moment, on arrive au maximum possible. On obtient la valeur du courant limite en faisant le quotient de l'amplitude de la tension de sortie par la résistance minimale qui autorise un fonctionnement correct :

$$(I_S)_{max} = \frac{V_{SM}}{R_{min}}$$

On trouve ainsi un courant maximal de l'ordre de 20 à 30 mA. Si l'on veut obtenir un courant plus important, on peut faire suivre l'amplificateur de tension par un amplificateur de courant réalisé par exemple avec des transistors (voir le chapitre suivant). Si l'amplificateur opérationnel atteint la limite de courant, le montage ne remplit plus sa fonction, mais il n'y a pas destruction : le composant est protégé par cette limitation interne.

Fréquence maximale

La rapidité d'un signal sinusoïdal est chiffrée par sa fréquence : un signal est d'autant plus rapide que sa fréquence est élevée. Un montage à amplificateur opérationnel ne peut amplifier que des tensions relativement lentes, la limite dépendant du type de circuit intégré employé.

Pour observer la limitation de rapidité du montage, on revient aux conditions de départ (amplificateur à vide, entrée sinusoïdale d'amplitude 0,5 V et de fréquence 1 kHz) et on augmente progressivement la fréquence du signal. À partir de 15 à 20 kHz, on commence à voir une déformation de la tension de sortie : les passages de la sinusoïde par zéro se linéarisent. En continuant à augmenter la fréquence, on finit par avoir une tension de sortie triangulaire (*figure 3.10*). Ce phénomène est dû à la vitesse maximale de variation de la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel (*slew rate*) : la pente de la variation du signal de sortie est limitée à une valeur S imposée par le circuit intégré. On vérifie qu'il s'agit bien d'une pente maximale en constatant que la déformation disparaît si l'on diminue le niveau

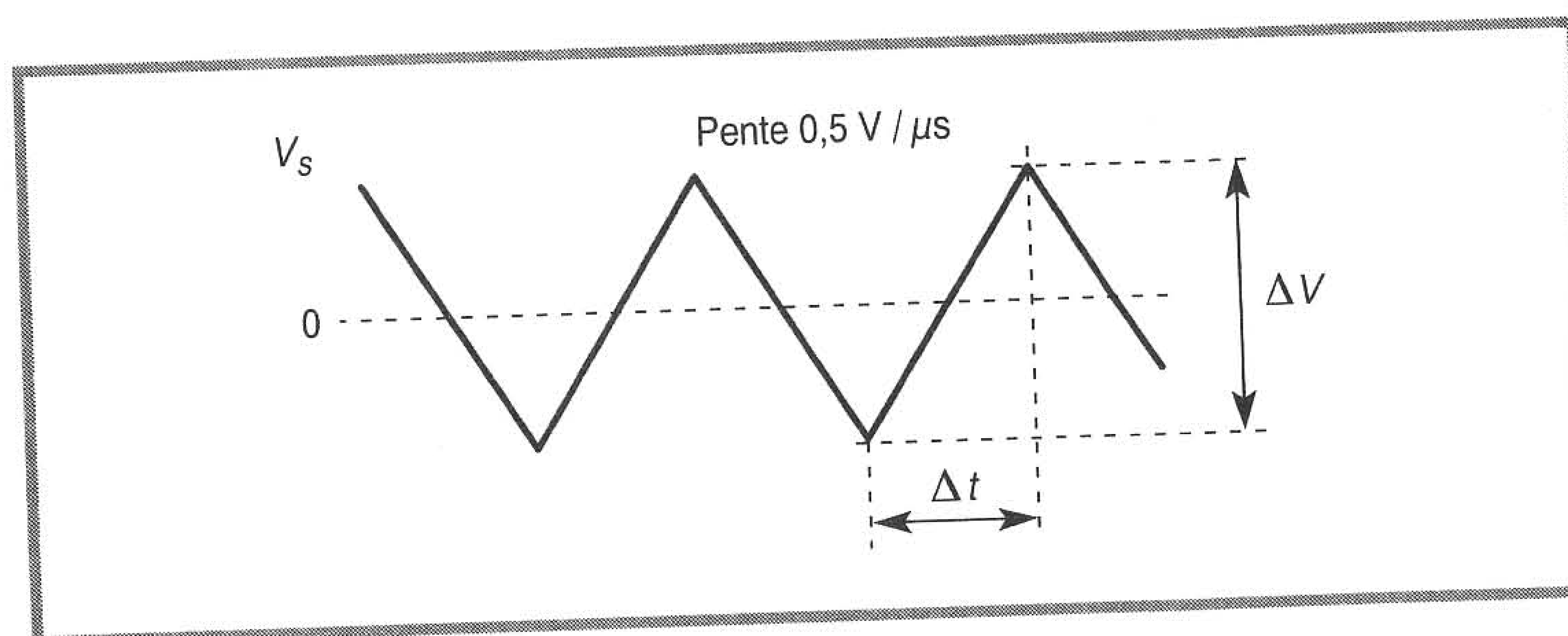


Figure 3.10 - Forme du signal de sortie quand la tension d'entrée est sinusoïdale de fréquence élevée.

d'entrée à fréquence constante. Pour déterminer la valeur du *slew rate* de l'amplificateur opérationnel utilisé, on se place dans le cas où le signal de sortie est devenu triangulaire et on fait le quotient de la variation de tension ΔV par la durée Δt correspondante (voir ces grandeurs sur la *figure 3.10*) :

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

On trouve un résultat de l'ordre de 0,5 V/µs. La valeur obtenue peut légèrement différer du nombre indiqué car ce type de paramètre est soumis à une certaine dispersion, c'est-à-dire que les mesures faites sur des composants de même référence sont voisines mais pas identiques. Les constructeurs de circuits intégrés donnent une « valeur typique » des paramètres utiles dans les notices : c'est une indication d'ordre de grandeur, mais il ne faut pas s'attendre à trouver exactement ce résultat lors d'une mesure.

3.4 Application

L'amplificateur étudié s'utilise très facilement car son entrée ne consomme pratiquement aucun courant et sa tension ne chute pas quand on branche une charge (à condition bien sûr que le courant demandé soit inférieur à la limite possible).

On peut par exemple réaliser une source de tension stabilisée avec une diode Zener comme le montre la *figure 3.11*.

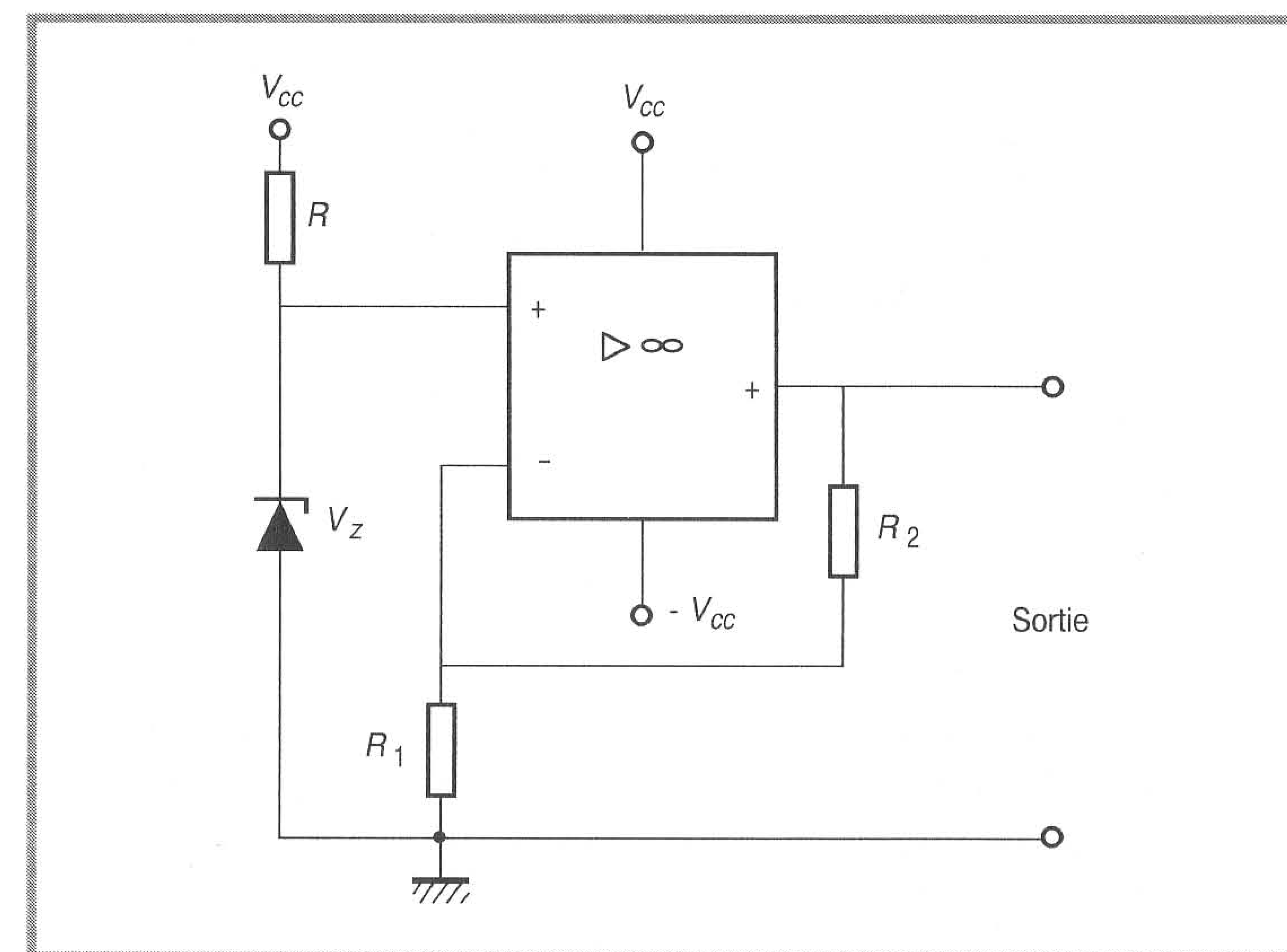


Figure 3.11 - Schéma de la source de tension stabilisée.

Ce montage permet d'obtenir une tension continue de référence. Une diode Zener maintient à ses bornes une tension constante V_Z à condition qu'elle soit correctement polarisée. Pour cela, il faut appliquer une tension inverse (c'est-à-dire le pôle positif vers la cathode) de valeur supérieure à V_Z par l'intermédiaire d'une résistance R. Cette dernière doit être choisie pour limiter le courant à un niveau compatible avec la puissance maximale de la diode Zener.

Après amplification par le montage à amplificateur opérationnel, on obtient la tension stabilisée désirée.

On se propose par exemple de réaliser une source de tension 9 V. L'amplificateur opérationnel doit être alimenté par une tension supé-

rieure d'environ 2 V à la tension de sortie désirée : on choisit 12 V. La tension de sortie du montage est donnée par la formule :

$$v_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z$$

De nombreux choix sont possibles pour V_Z, R_1 et R_2. On choisit V_Z = 6,2 V car c'est pour cette valeur que la température a le moins d'influence sur la caractéristique de la diode.

On en déduit qu'il faut avoir :

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{9}{6{,}2}$$

soit :

$$R_2 = 0{,}45 R_1$$

On prend par exemple R_1 = 10 kΩ et R_2 = 4,7 kΩ dans la série E12.

Il reste à déterminer la valeur de *R*. Les diodes Zener courantes autorisent une dissipation de 400 mW.

Le courant maximal qui peut traverser la diode est :

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_Z}$$

soit numériquement :

$$I_{max} = \frac{0{,}4}{6{,}2} = 0{,}065 \text{ A} \quad (65 \text{ mA})$$

La loi d'Ohm nous donne :

$$V_{CC} - V_Z = RI$$

La valeur minimale de la résistance est alors :

$$R_{min} = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{max}}$$

soit :

$$R_{min} = \frac{12 - 6{,}2}{0{,}065} = 89 \ \Omega$$

Comme l'amplificateur opérationnel ne prélève aucun courant, il n'y a pas d'autre condition sur *R*. On a alors intérêt à choisir une valeur très supérieure au minimum afin d'économiser le courant consommé sur l'alimentation.

Prenons par exemple *R* = 10 kΩ. La puissance dissipée dans cette résistance est :

$$\frac{\left(V_{CC} - V_Z\right)^2}{R} = \frac{(12 - 6{,}2)^2}{10\ 000} = 0{,}0034 \text{ W} \quad (3{,}4 \text{ mW})$$

Une résistance ordinaire $^1/_4$ W convient.

Après réalisation du montage avec les composants choisis, on mesure la tension de sortie à l'aide d'un multimètre utilisé en voltmètre continu. On obtient une valeur proche de 9 V. L'écart observé vient du fait que le choix de résistances dans la série E12 n'a pas permis d'assurer exactement la condition souhaitée, mais aussi que la tolérance sur les éléments empêche de toute manière d'obtenir une très bonne précision sur le résultat.

Pour améliorer la qualité de la réalisation, il faudrait soit utiliser des composants de précision (résistances à 1 % par exemple), soit prévoir un ajustage en remplaçant l'une des résistances par l'association en série d'un élément fixe et d'un potentiomètre.

On peut enfin constater expérimentalement que la tension de sortie ne chute pas quand on branche une résistance de charge comme l'indique la *figure 3.12*.

Si le courant maximal de sortie de l'amplificateur opérationnel est $(I_S)_{max}$ = 20 mA (soit 0,02 A), la valeur minimale de la résistance de charge est :

$$(R_u)_{min} = \frac{9}{0{,}02} = 450 \ \Omega$$

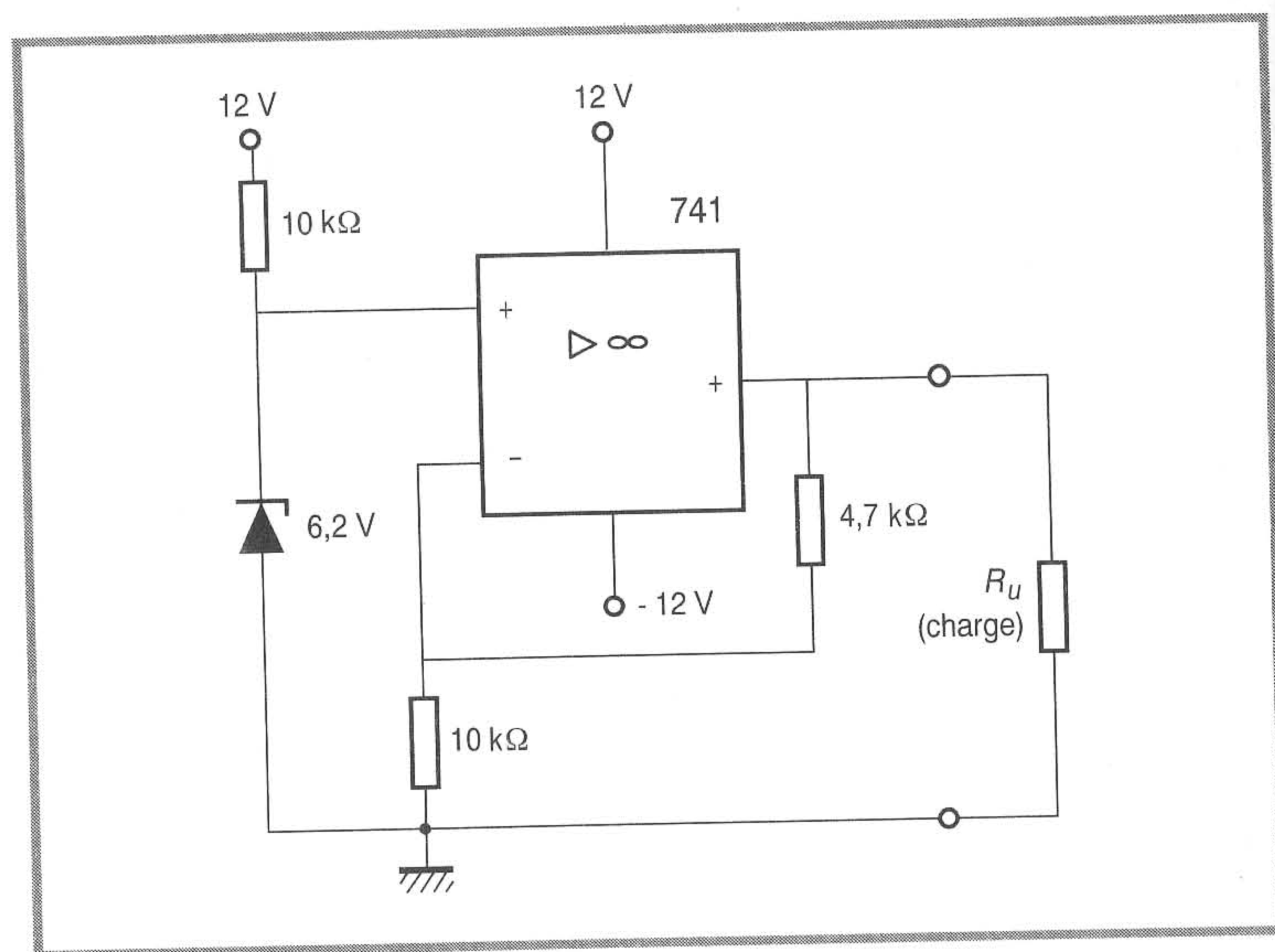


Figure 3.12 – Réalisation d'une source de tension 9 V.

AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE À TRANSISTOR

Certaines charges des montages électroniques demandent une puissance non négligeable pour fonctionner : résistances de faible valeur, haut-parleurs, petits moteurs électriques… Les circuits intégrés ne peuvent pas fournir la puissance nécessaire car leurs petites dimensions ne permettent pas une dissipation importante de chaleur. Il faut alors faire appel à des transistors discrets (c'est-à-dire seuls dans un boîtier) qui peuvent évacuer la puissance voulue à condition dans certains cas de les placer sur un « radiateur », ou plutôt un refroidisseur, c'est-à-dire une plaque métallique qui facilite les échanges de chaleur avec l'extérieur.

4.1 Description du schéma et choix des composants

On souhaite alimenter une charge résistive $R = 220\ \Omega$ avec l'amplificateur de tension à circuit intégré que l'on a décrit au chapitre précédent. On ne peut pas connecter directement la résistance à la sortie de l'amplificateur car le circuit intégré n'est pas en mesure de fournir le courant nécessaire dans toutes les conditions. Par exemple, la tension maximale présente en sortie est de l'ordre de 14 V (l'alimentation continue étant 15 V et – 15 V) et le courant correspondant est :

$$I = \frac{14}{220} = 0{,}064\ \text{A} \quad (64\ \text{mA})$$

L'intensité maximale que peut débiter l'amplificateur opérationnel est de l'ordre de 20 à 30 mA, donc ce composant est en limitation de courant et le montage ne réalise pas la fonction prévue.

Pour résoudre ce problème, on fait suivre l'amplificateur de tension à circuit intégré d'un amplificateur de courant à transistors. Ce dernier montage correspond au schéma de la *figure 4.1*.

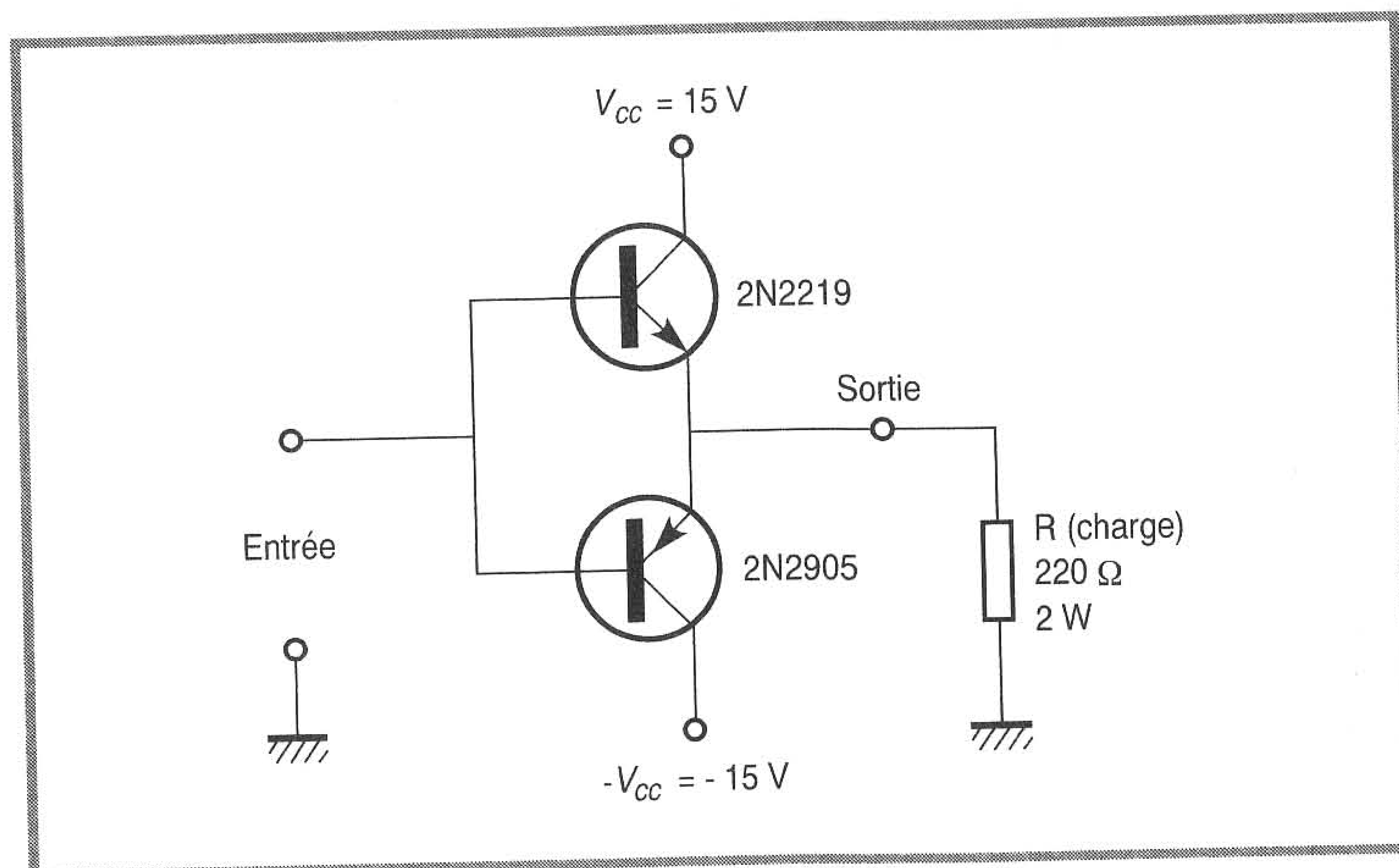


Figure 4.1 – Schéma de l'amplificateur de puissance.

Il est formé de deux transistors, l'un du type NPN (T_1) et l'autre du type PNP (T_2). Les deux modèles choisis (2N2219 et 2N2905) ont des performances voisines : on dit que ce sont des transistors complémentaires. Le choix de ces composants est essentiellement fonction de la puissance qu'ils peuvent dissiper. Dans notre cas, la plupart des transistors conviennent car la puissance à évacuer reste faible. Le maximum de cette puissance est donné par la formule :

$$P_{d\,max} = \frac{V_{CC}^2}{4R}$$

ce qui donne dans notre exemple :

$$P_{d\,max} = \frac{15^2}{4 \times 220} = 0{,}26\ \text{W}$$

Il est à noter que la puissance dissipée dans un transistor n'est pas maximale lorsque la puissance utile (c'est-à-dire dans la charge) est maximale. Il faut cependant dimensionner les transistors en considérant toujours le cas le plus défavorable qui puisse se présenter. On montre que le maximum de puissance dans un transistor est obtenu quand celui-ci est toujours conducteur (fonctionnement avec une tension d'entrée continue) et que la tension de sortie est égale à la moitié de la tension d'alimentation V_{CC}.

La dissipation maximale possible est 0,6 W pour un 2N2219 et 0,8 W pour un 2N2905. Ces deux transistors sont disponibles dans des boîtiers métalliques du type TO-5. Leur brochage commun est indiqué à la *figure 4.2*. On remarquera bien qu'il s'agit d'une vue de dessous comme le veut l'habitude pour les transistors alors que les circuits intégrés sont au contraire vus de dessus.

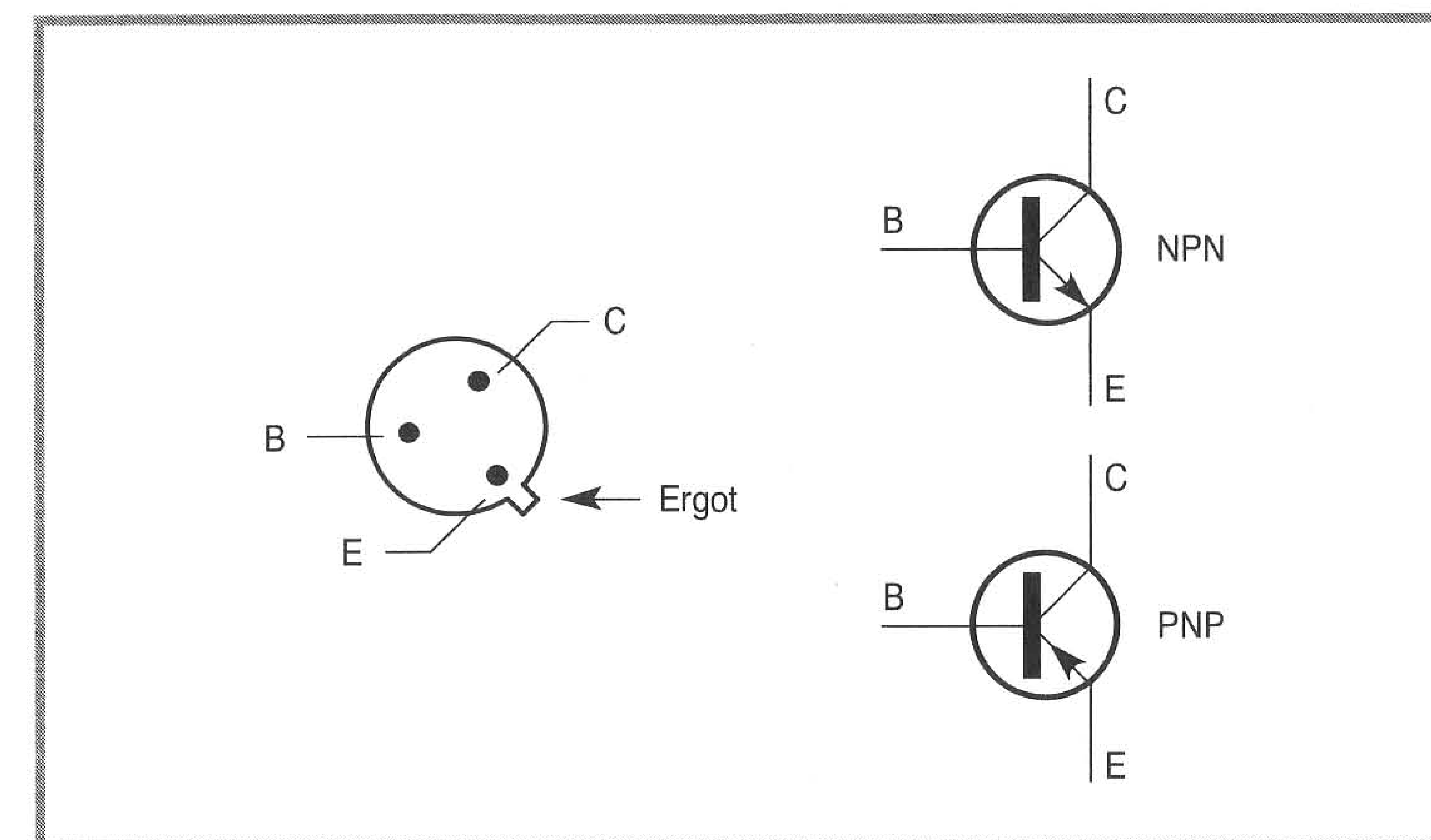


Figure 4.2 – Brochage des transistors (vue de dessous) et correspondance avec les symboles.

Les transistors T_1 et T_2 fonctionnent en classe B. De manière simplifiée, les deux transistors sont bloqués au repos (en l'absence de signal d'entrée), T_1 devient conducteur lorsqu'on applique une tension

d'entrée positive et T_2 est, lui, passant quand on applique une tension négative. Cette configuration permet d'obtenir un rendement nettement supérieur à celui que l'on obtient en utilisant un transistor toujours conducteur, même au repos (fonctionnement en classe A). Toutefois, il est nécessaire d'associer deux transistors complémentaires si on désire traiter des tensions de signe quelconque. Le montage n'amplifie pas la tension car les transistors sont montés en « collecteur commun », c'est-à-dire que leur collecteur est placé à un potentiel fixe (une alimentation continue), que l'entrée est sur la base et la sortie sur l'émetteur. Par contre, ce montage amplifie beaucoup le courant.

Le montage nécessite deux alimentations dont les valeurs fixeront l'excursion possible de la tension de sortie. On a choisi ici 15 V et – 15 V pour obtenir une compatibilité avec l'amplificateur de tension déjà étudié. Il faut évidemment s'assurer que les alimentations puissent fournir le courant dans la charge qui peut être important si la résistance est faible. Le chemin suivi par ce courant est précisé à la *figure 4.3* dans le cas d'une tension positive puis dans le cas d'une tension négative (on a négligé le courant de base des transistors qui reste faible devant le courant de collecteur). La résistance de charge *R* doit pouvoir dissiper la puissance due à l'effet Joule de ce courant. Dans le cas le plus défavorable, la tension aux bornes de la charge est voisine de 15 V et la puissance est alors :

$$P_{u\,max} = \frac{15^2}{220} = 1 \text{ W}$$

Il faut employer une résistance de puissance, 2 W par exemple.

4.2 Vérification du fonctionnement

On câble le montage et on l'alimente par deux sources de tensions continues réglées à 15 V. On branche le générateur de fonctions à l'entrée de l'amplificateur, la tension d'entrée étant choisie sinusoïdale, de fréquence 1 kHz et d'amplitude 5 V. L'oscilloscope est relié à l'entrée et à la sortie du montage. On observe que la tension aux bornes de la charge est sensiblement sinusoïdale et que son amplitude est peu différente de celle de la tension appliquée.

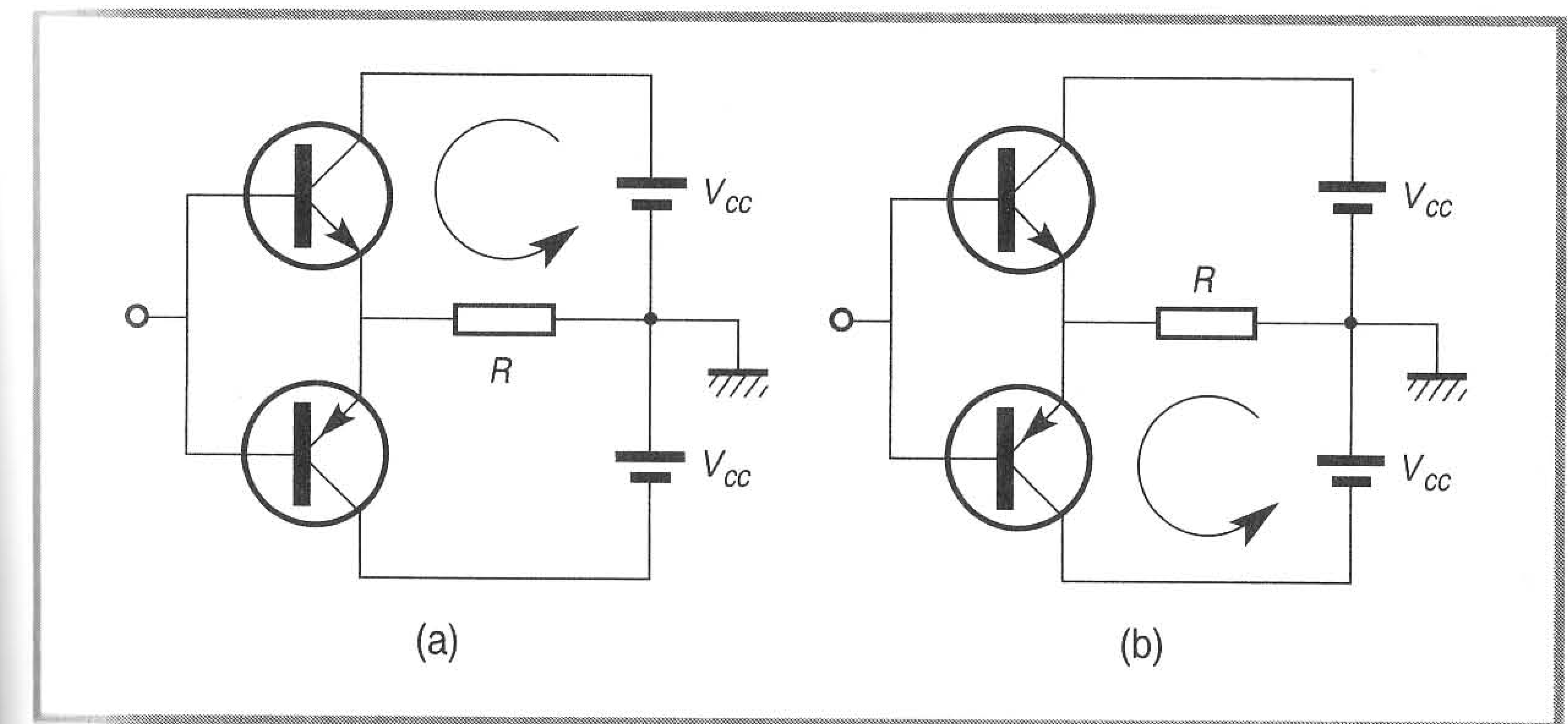


Figure 4.3 – Circulation du courant dans le cas d'une tension d'entrée positive (a) puis négative (b).

On constate toutefois un petit défaut de la sinusoïde à ses passages par zéro : il s'agit de la distorsion de croisement qui est due au fait que les transistors ne deviennent pas conducteurs dès que la tension d'entrée devient positive (pour un NPN) ou négative (pour un PNP). Il faut atteindre le seuil de conduction qui est de l'ordre de 0,5 V pour un transistor NPN (– 0,5 V pour un PNP). Quand la tension d'entrée est comprise entre – 0,5 V et 0,5 V, les deux transistors sont bloqués, aucun courant ne circule dans la charge et la tension de sortie reste nulle. Ce défaut disparaît dans beaucoup de montages grâce aux effets de la contre-réaction comme on le verra dans l'application de ce chapitre.

Pour vérifier ce qui a été dit sur le chemin emprunté par le courant, on peut utiliser l'amplificateur en continu. On constate alors que quand on applique une tension supérieure à 0,5 V, le courant traverse le transistor T_1 qui est donc bien conducteur tandis que si la tension appliquée est inférieure à – 0,5 V, le courant traverse le transistor T_2. Pour voir le trajet du courant dans chaque cas, il suffit d'utiliser le multimètre en ampèremètre et de le brancher successivement dans les différentes branches du circuit.

4.3 Limites d'utilisation

Tension minimale

Quand on diminue progressivement l'amplitude de la tension d'entrée (sinusoïdale par exemple), on constate que la distorsion de croisement apparaît de plus en plus. Ce phénomène s'explique facilement : le seuil de conduction des transistors reste toujours voisin de 0,5 V et son importance devient de plus en plus grande quand le niveau du signal diminue. On obtient alors une tension de sortie déformée comme le montre la *figure 4.4*. À l'extrême, si l'amplitude de la tension d'entrée devient inférieure au seuil des transistors, plus aucun signal n'apparaît en sortie, les transistors n'étant jamais conducteurs. Il résulte des observations précédentes que le montage étudié n'est utilisable tel quel que si le niveau d'entrée est grand devant 0,5 V. La limite précise ne dépend que de la qualité qu'on exige pour le signal de sortie que l'on chiffre par le taux de distorsion.

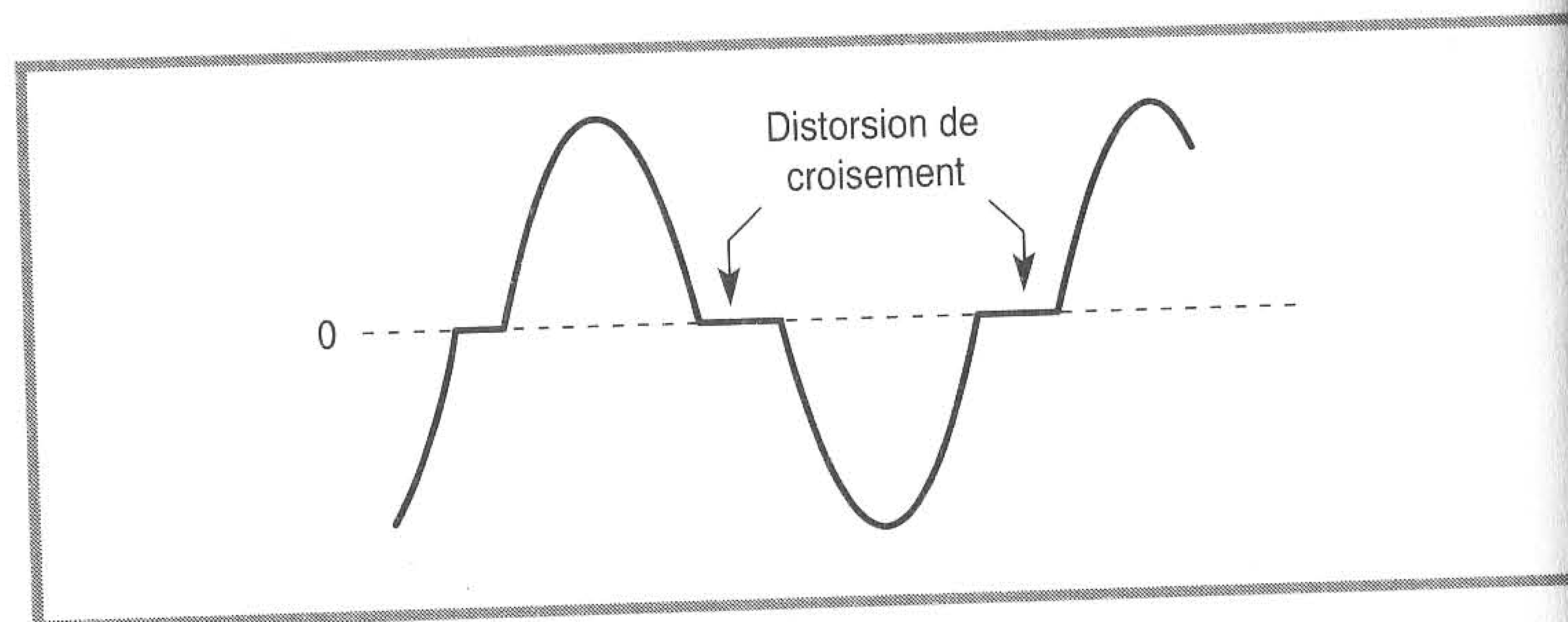


Figure 4.4 – Déformation de la tension de sortie à faible niveau.

Tension maximale

Le maximum possible pour la tension de sortie correspond à la saturation des transistors. Dans ce cas, la tension v_{CE} entre collecteur et émetteur est égale à quelques dixièmes de volts. L'amplitude

de la tension de sortie est alors légèrement inférieure à l'alimentation. La tension d'entrée maximale est un peu plus grande du fait de la tension v_{BE} entre base et émetteur : elle dépasse donc un peu la tension d'alimentation. Dans l'utilisation envisagée, le signal d'entrée étant fourni par la sortie de l'amplificateur de tension alimenté sous – 15 V et 15 V, il restera toujours inférieur à la tension d'alimentation et respectera ainsi les limites permises.

Courant maximal

Si l'on demande au montage de fournir un courant important, la puissance dissipée dans les transistors va s'élever et ceux-ci risquent de chauffer excessivement et de se détruire. Un choix essentiel pour un tel amplificateur est celui des transistors qui doivent pouvoir dissiper la puissance nécessaire dans le cas le plus défavorable. Dès qu'on atteint une puissance notable, il faut placer les transistors sur un radiateur correctement choisi. Le calcul des échanges thermiques est une partie importante de la conception d'un montage de puissance.

4.4 Application

Les amplificateurs de puissance à transistors sont rarement utilisés seuls, mais souvent associés à un amplificateur de tension. Plutôt que de mettre les deux montages simplement à la suite, on préfère appliquer une contre-réaction à l'ensemble de la chaîne amplificatrice comme le montre la *figure 4.5*. Cette solution permet d'améliorer la plupart des performances de l'ensemble et, en particulier, de diminuer dans des proportions importantes la distorsion de croisement. On constate facilement en reprenant l'étude expérimentale aux faibles niveaux, que l'on peut diminuer l'amplitude de la tension d'entrée sans qu'apparaisse de distorsion. La solution employée n'est toutefois valable que pour des fréquences peu élevées, car les propriétés de l'amplificateur opérationnel se dégradent lorsque les signaux sont plus rapides. Le principe de la contre-réaction est cependant utilisé pour la plupart des amplificateurs de ce type, même si la réalisation pratique peut être différente.

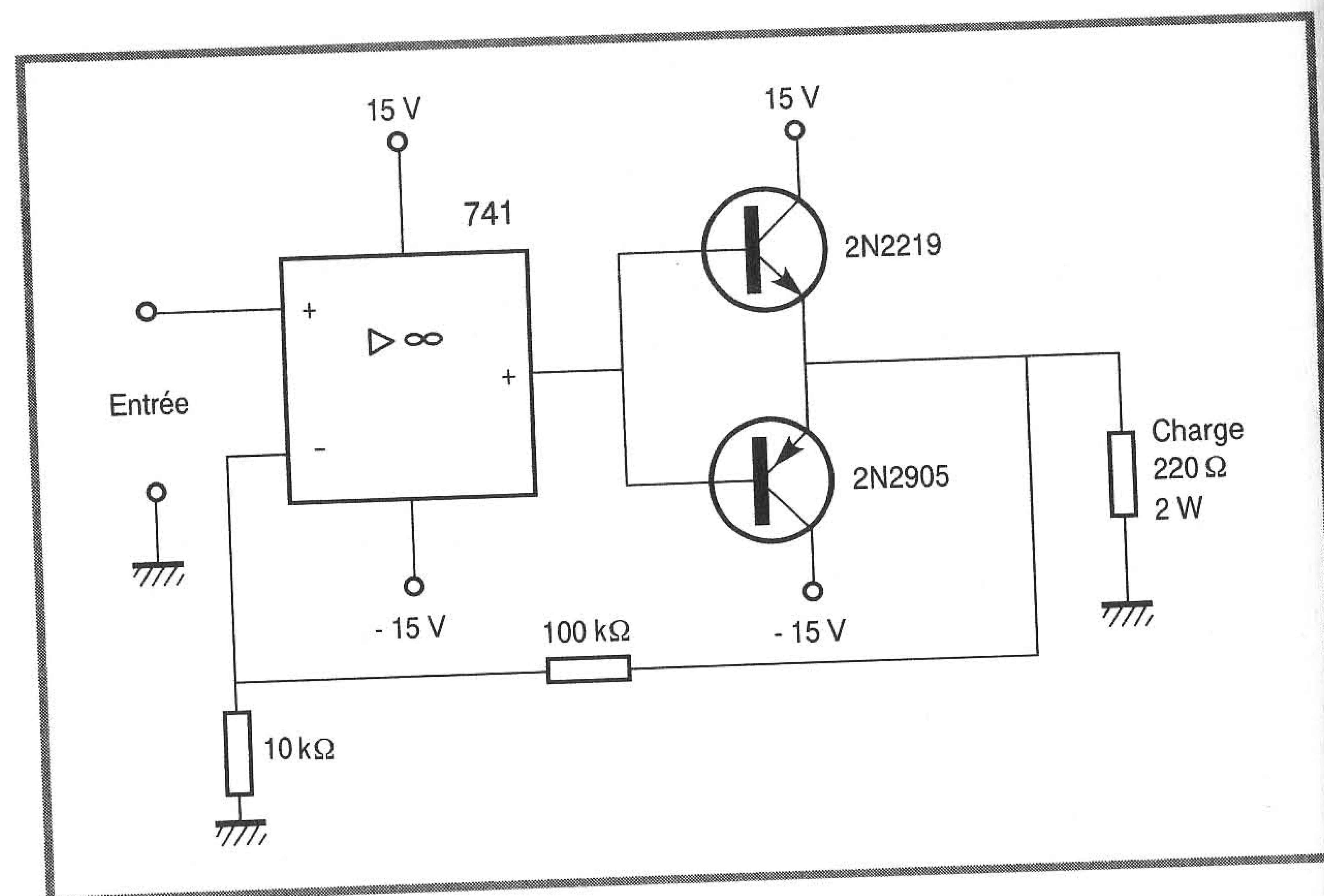


Figure 4.5 – Contre-réaction sur l'amplificateur de puissance.

CHAPITRE 5

FILTRE PASSE-BAS

Le filtrage est une opération que l'on rencontre très souvent en électronique, mais sa compréhension n'est pas facile car elle fait appel à un raisonnement dans le « domaine des fréquences » et non dans le « domaine du temps » comme pour les fonctions plus simples. On se propose dans ce chapitre d'étudier un filtre élémentaire pour avoir une première approche des notions à assimiler si l'on veut bien utiliser ces types de circuits.

5.1 Description du schéma et choix des composants

On réalise un filtre avec uniquement une résistance et un condensateur : le schéma est celui de la *figure 5.1.*

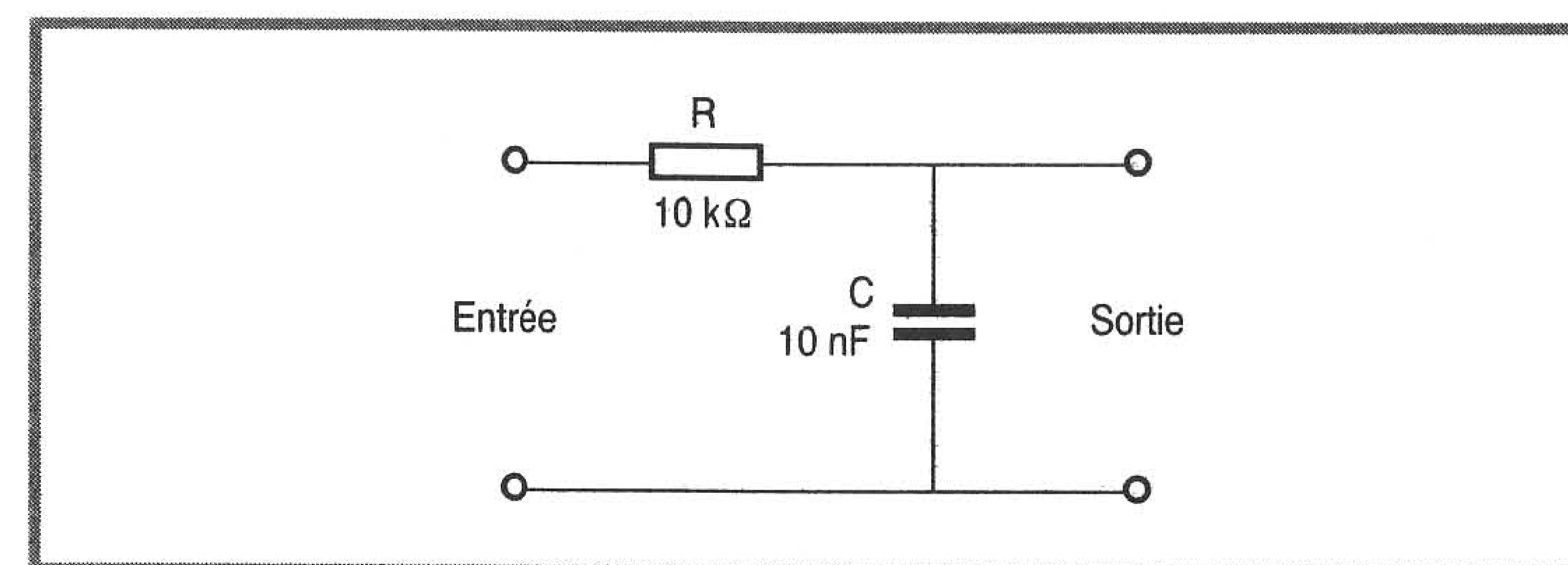


Figure 5.1 – Schéma du filtre passe-bas.

Pour définir les effets d'un tel filtre, on se place avec des signaux tests particuliers. Tout d'abord, on choisit une tension d'entrée continue. Comme un condensateur « ne passe pas le continu », aucun courant ne parcourt la résistance (à condition que le montage soit à vide), il n'y a donc pas de chute de tension entre l'entrée et la sortie : le filtre transmet complètement le signal continu qui lui est appliqué. Ensuite, on choisit une tension d'entrée sinusoïdale. Le condensateur présente alors une certaine impédance Z qui dépend de la fréquence f des signaux :

$$Z = \frac{1}{2\pi f C}$$

Le montage se présente comme un diviseur de tension entre deux impédances : R pour la résistance et Z pour le condensateur. R reste constante si l'on modifie la fréquence tandis que Z diminue lorsque la fréquence augmente, puisque f apparaît au dénominateur de la formule. Il en résulte que la valeur efficace de la tension de sortie devient de plus en plus petite quand on augmente la fréquence. L'impédance Z devient très faible pour les hautes fréquences et, en conséquence, la tension de sortie est alors pratiquement nulle. Le filtre étudié laisse passer les signaux de fréquences basses, mais élimine les signaux de fréquence élevée : c'est un filtre passe-bas. On peut définir ainsi les différents types de filtres. Le circuit passe-haut laisse passer les hautes fréquences et coupe les basses fréquences. Le filtre passe-bande ne laisse passer que les signaux dont les fréquences appartiennent à une certaine bande, tandis que le filtre coupe-bande élimine les signaux dans une bande de fréquences. Pour déterminer une limite précise aux intervalles de fréquences, on définit la fréquence de coupure : c'est la valeur particulière f_C de la fréquence pour laquelle la tension de sortie est égale à 0,7 fois la tension d'entrée (cela correspond en fait à un rapport $1/\sqrt{2}$) :

$$\frac{V_S}{V_E} = 0{,}7 \quad \text{pour} \quad f = f_C$$

On parle de fréquence de coupure à 3 dB. Le décibel (symbole dB) est une facon de chiffrer le gain d'un amplificateur ou l'affaiblissement d'un atténuateur ou d'un filtre en utilisant une échelle logarithmique. On définit le gain en décibels par :

$$G = 20 \lg \frac{V_S}{V_E}$$

Le symbole lg représente la fonction logarithme décimal (souvent notée log sur les calculatrices). Pour trouver le nombre de décibels correspondant à un rapport de tensions donné, il suffit donc sur la calculatrice d'appuyer sur la touche « log » puis de multiplier le résultat par 20. On a donc par exemple les correspondances suivantes :

$\frac{V_S}{V_E}$	0,1	0,7	1	1,41	10
G (dB)	– 20	– 3	0	3	20

atténuation (G négatif) — amplification (G positif)

La fréquence de coupure correspond à un affaiblissement de 3 dB, c'est-à-dire à un gain de – 3 dB (on dit parfois fréquence de coupure à – 3 dB). L'intervalle de fréquence dans lequel l'affaiblissement du signal est inférieur à 3 dB est appelé bande passante du filtre tandis que le domaine où l'affaiblissement est supérieur à 3 dB est nommé bande coupée. On constate que même dans la bande passante, le signal peut être un peu atténué : dans le cas le plus défavorable, il est multiplié par 0,7.

Le raisonnement que l'on vient de faire sur les impédances ne suffit pas pour déterminer complètement la tension de sortie car il ne permet d'obtenir d'informations que sur les valeurs efficaces des signaux. Un deuxième renseignement nécessaire est le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie. Le courant dans un condensateur est en avance de 90° sur la tension à ses bornes. Il en résulte ici que la tension de sortie (prise aux bornes du condensateur) est en retard sur la tension d'entrée (prise aux bornes de l'ensemble résistance-condensateur). L'angle de retard dépend de la fréquence

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

et varie entre 0 et 90°. Il est nul quand la fréquence est petite devant f_C et voisin de 90° quand la fréquence est devenue nettement supérieure à f_C. La *figure 5.2* représente l'allure des signaux dans le cas particulier $f = f_C$. On remarque qu'on a alors un retard de 45°.

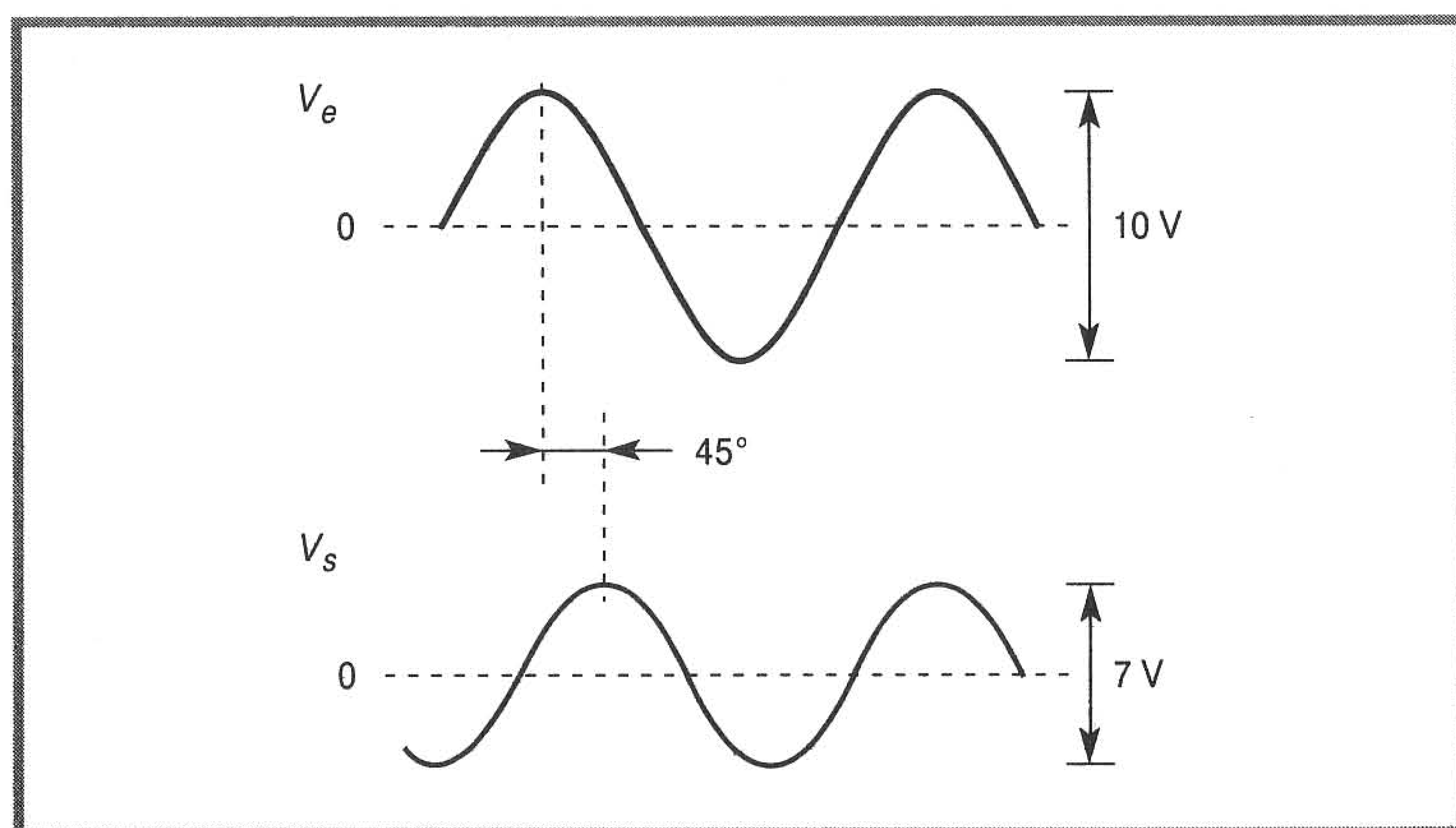


Figure 5.2 – Allure des signaux d'entrée et de sortie du filtre pour $f = f_C$.

On montre que la fréquence de coupure à 3 dB du filtre passe-bas étudié est donnée par la formule :

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC}$$

Avec les éléments choisis, cela donne :

$$f_C = \frac{1}{2\pi \times 10^4 \times 10^{-8}} = 1\,590 \text{ Hz} \quad (1{,}59 \text{ kHz})$$

Dans l'utilisation pratique d'un filtre, les signaux d'entrée ne sont a priori pas sinusoïdaux. Pourtant, l'étude d'un filtre se fait habituellement en régime sinusoïdal, que ce soit pour le calcul ou pour l'expérimentation. L'importance du sinusoïdal tient à deux raisons : tout

d'abord, c'est le seul signal qui ne soit pas déformé par un filtre, quelle que soit la fréquence, ensuite, tout signal périodique peut être considéré comme la superposition d'un certain nombre de sinusoïdes. Ce dernier résultat, connu en mathématiques sous le nom de « décomposition en série de Fourier », a une grande utilité en électronique. Seul l'aspect qualitatif de la question nous intéresse ici. Un signal périodique peut se décomposer en une somme comprenant un terme constant (composante continue), un terme sinusoïdal de même fréquence que le signal de départ (nommé fondamental) et un certain nombre de termes sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence du fondamental (ce sont les harmoniques). Un filtre est un montage qui transmet une partie des composantes du signal (celles dont la fréquence est dans la bande passante) et qui atténue une autre partie des composantes (celles dont la fréquence est dans la bande coupée). La tension de sortie n'a donc pas en général la même forme que la tension d'entrée. Pour étudier l'effet d'un filtrage, on considère donc les différentes composantes sinusoïdales du signal en regardant si elles sont transmises ou éliminées. On dit que l'on travaille dans le « domaine des fréquences » car la variable importante est la fréquence de la composante. L'ensemble des composantes sinusoïdales d'un signal est appelé « spectre ».

Un filtre peut avoir des rôles divers dans un ensemble électronique. Il peut par exemple éliminer des parasites tout en transmettant le signal utile. En effet, beaucoup de parasites étant des signaux de hautes fréquences, il suffit d'employer un filtre passe-bas dont la bande passante est telle que le spectre du signal utile soit correctement transmis. Un filtre passe-bande permet, lui, de sélectionner un signal parmi d'autres. Dans un récepteur radio par exemple, il faut séparer les signaux émis par les diverses stations et qui se situent dans des bandes de fréquence différentes. Dans certains cas particuliers, le filtre peut éliminer toute variation du signal pour ne conserver que la composante continue : le circuit doit être passe-bas, avec une fréquence de coupure nettement inférieure à la fréquence du signal. On détecte ainsi la valeur moyenne de la tension. Beaucoup d'autres applications des filtres sont possibles dans tous les domaines de l'électronique.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

5.2 Vérification du fonctionnement

Après avoir câblé le montage, on branche le générateur de fonctions à l'entrée. Pour visualiser les tensions, on place la voie A de l'oscilloscope sur le générateur et la voie B à la sortie. On peut ainsi tester le fonctionnement du filtre avec divers signaux d'entrée.

En mettant le générateur sur la position « continu », on vérifie que les tensions d'entrée et de sortie sont identiques, quel que soit leur niveau. Ensuite, on place le générateur sur la position « sinusoïdal ». On commence par des fréquences basses (quelques centaines de hertz). On constate alors que les signaux ne sont ni atténués ni déphasés (ou très peu). Ces fréquences appartiennent à la bande passante du filtre. En augmentant progressivement la fréquence, on constate que la tension de sortie s'affaiblit et se déphase par rapport à la tension d'entrée. Quand on arrive à une fréquence voisine de 1,59 kHz (fréquence de coupure), on constate que l'amplitude en sortie est bien 0,7 fois l'amplitude en entrée et que le déphasage est de 45° (sortie en retard sur l'entrée). En continuant à augmenter la fréquence, on observe une diminution continuelle de l'amplitude et un décalage de plus en plus grand entre les deux courbes. À partir d'un certain moment, on peut considérer que le déphasage est pratiquement 90°, mais le niveau est alors très faible. En modifiant l'amplitude au générateur, on voit que celle-ci n'a pas d'influence sur le comportement du circuit (le rapport des amplitudes reste constant). Aux fréquences élevées, on a intérêt à choisir un niveau d'entrée élevé si l'on veut encore pouvoir mesurer la tension de sortie.

On peut aussi observer l'influence d'une composante continue (décalage du générateur) : celle-ci n'est pas modifiée par le filtre. En particulier, si l'on applique à l'entrée du montage une tension comportant une composante continue et une composante sinusoïdale de fréquence élevée (quelques dizaines de kilohertz), on constate qu'en sortie, il ne reste que la composante continue : on a réalisé une détection de valeur moyenne.

On peut enfin voir qualitativement l'effet du filtrage sur des signaux non sinusoïdaux (triangulaires ou carrés, avec ou sans composante continue). On constate une déformation des signaux très variable suivant leur fréquence.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

5.3 Limites d'utilisation

On remarque facilement que le filtre étudié ne donne le résultat prévu que si sa sortie est à vide. Il suffit pour cela de brancher une résistance en sortie et de voir les modifications entraînées. On choisit par exemple une résistance de 10 kΩ (identique à R). En continu, on mesure une tension de sortie égale à la moitié de la tension d'entrée. En effet, dans ce cas le condensateur est un circuit ouvert et il reste un diviseur de tension formé de deux résistances identiques. En sinusoïdal, on note la même diminution de niveau dans la bande passante, mais aussi une modification de la fréquence de coupure. Ce filtre ne pouvant donc pas être chargé, il faut compléter le montage pour permettre l'obtention d'un courant de sortie significatif. On peut pour cela utiliser un amplificateur opérationnel monté en « suiveur », comme le montre la *figure 5.3*.

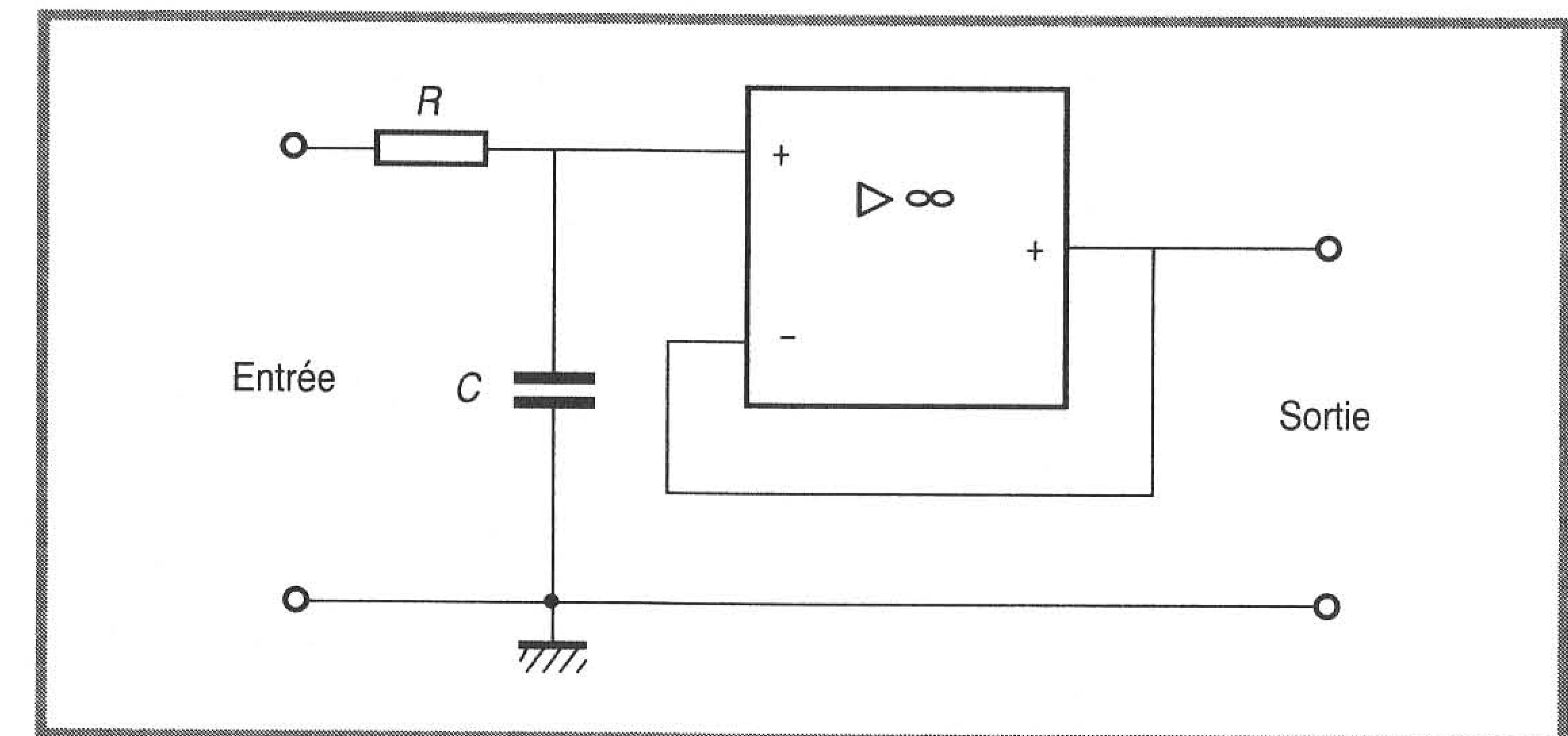


Figure 5.3 – En ajoutant un amplificateur opérationnel, on obtient un filtre actif.

C'est un amplificateur du même type que celui du chapitre 3, mais la résistance R_2 est nulle (court-circuit) et la résistance R_1 est infinie (circuit ouvert). L'amplification de l'étage est donc égale à 1, ce qui veut dire que les signaux ne sont pas modifiés mais on profite du fait

que l'amplificateur opérationnel ne consomme pas de courant sur son entrée. Le filtre RC n'est pas chargé, mais on peut débiter un courant issu du circuit intégré.
Le montage complet a évidemment les propriétés et donc les limites d'un amplificateur (rapidité, tension maximale, courant maximal...). Le montage obtenu est un filtre actif (par opposition à celui du départ qui est dit passif). L'association d'amplificateurs opérationnels, de résistances et de condensateurs donne naissance à de nombreuses réalisations de filtres avec des structures plus complexes que celle qui a été envisagée, mais les principes d'étude restent les mêmes.

CHAPITRE 6

ALIMENTATION CONTINUE

Presque tous les montages électroniques demandent un apport d'énergie par une source de tension continue. Quand la consommation du circuit est faible, on peut se contenter d'utiliser une pile ou un accumulateur, mais dès que le débit est un peu plus élevé, le coût important de l'énergie électrique stockée conduit à préférer une alimentation à partir du secteur. Un certain nombre de problèmes se posent alors : le secteur est une tension alternative qu'il faut convertir en tension continue et l'amplitude de ce secteur est très élevée par rapport aux niveaux dont on a besoin dans les circuits électroniques.

6.1 Description du schéma et explication du fonctionnement

Un exemple d'alimentation à partir du secteur est représenté à la *figure 6.1.* On désire obtenir une tension continue relativement stable de 5 V et pouvoir débiter un courant allant jusqu'à 100 mA. On se propose de commencer par expliquer le rôle précis de chaque élément du montage.

Fusible

Le fusible permet de protéger le circuit en coupant l'un des fils d'arrivée du transformateur quand le courant devient trop élevé. Son calibre sera choisi après étude des courants dans le circuit. C'est un hasard si l'on a choisi ici un fusible de 0,1 A alors que le courant continu de sortie est aussi de 0,1 A.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

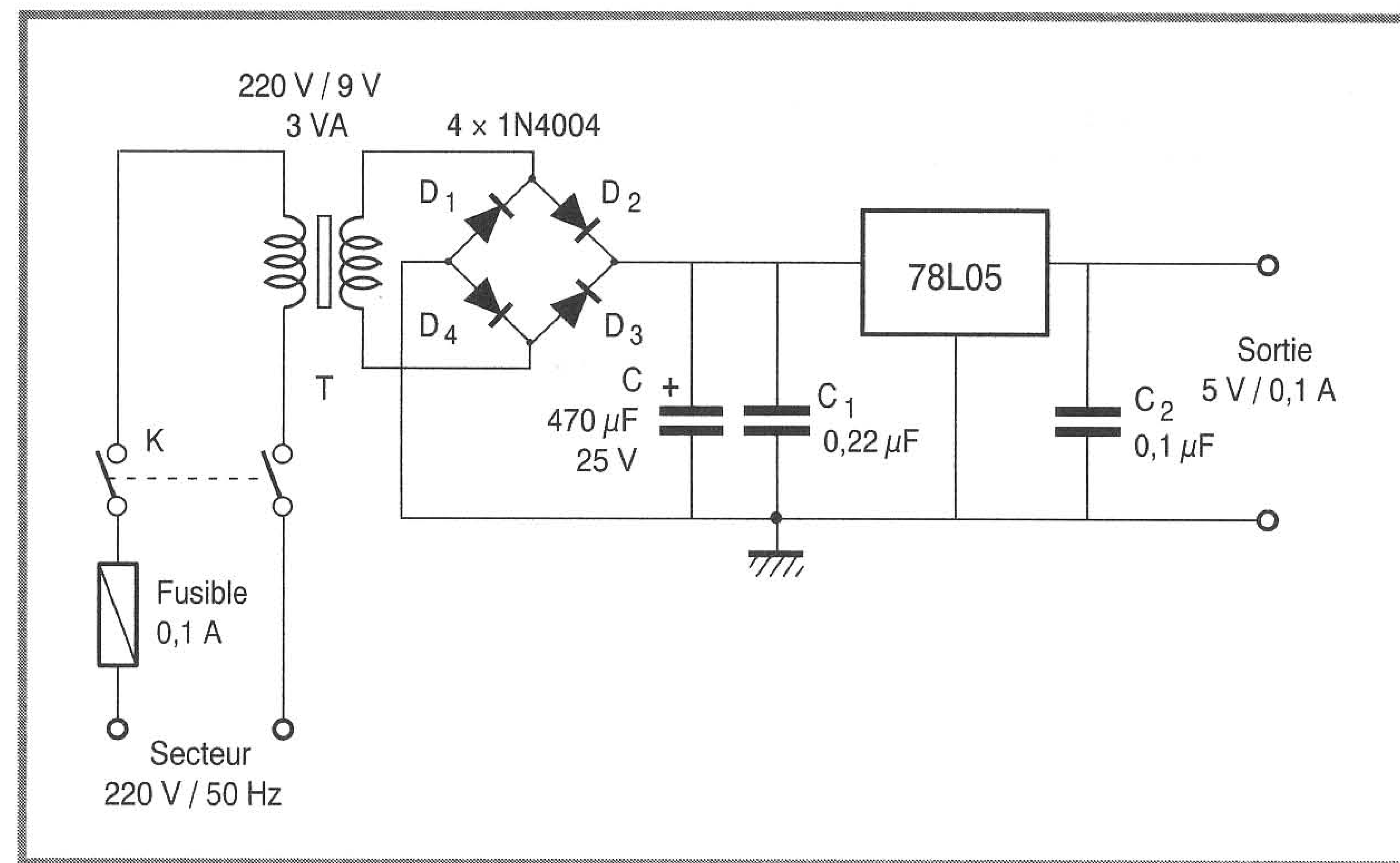


Figure 6.1 – Schéma de l'alimentation continue.

Interrupteur

On a choisi un interrupteur bipolaire, c'est-à-dire un élément qui coupe les deux phases du secteur. Cela permet qu'aucun point du montage ne soit lié au secteur après coupure de l'interrupteur. En effet, si l'on utilise un interrupteur unipolaire, un des fils du transformateur reste connecté au secteur et il peut donc être dangereux de toucher la borne correspondante qui peut être à un potentiel élevé si elle est reliée à la phase du secteur.

Transformateur

Le transformateur a un double rôle d'isolement et d'abaissement de la tension. L'isolement est nécessaire car en son absence, un point du montage pourrait être porté à un potentiel élevé s'il était relié directement à la phase du secteur. L'abaissement est également toujours indispensable car les tensions d'alimentation habituellement utilisées en électronique ne dépassent pas quelques dizaines de volts

(on trouve couramment 5 V, 12 V, 15 V...) alors que la valeur efficace de la tension du secteur est 220 V (ce qui correspond à une amplitude de $220\sqrt{2} = 311$ V).

Redressement

Le redressement est la conversion entre un signal alternatif et un signal unidirectionnel. C'est le rôle rempli par les diodes D_1, D_2, D_3 et D_4. L'ensemble de ces quatre diodes forme un « pont de Graetz ». Le fonctionnement de ce circuit est simple à expliquer quand on suppose la charge résistive (*figure 6.2*).

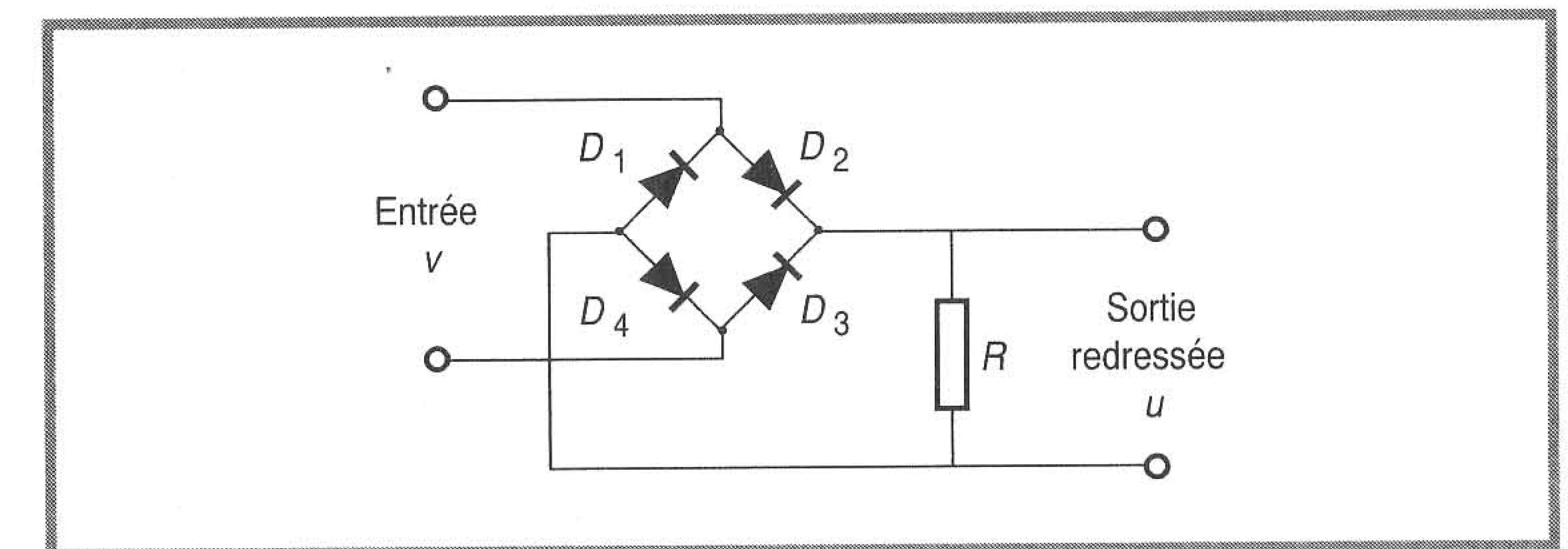


Figure 6.2 – Redresseur en pont de Graetz avec charge résistive.

En idéalisant la caractéristique des diodes (on néglige en particulier la tension à leurs bornes lorsqu'elles sont passantes), on obtient une tension dont la forme est indiquée à la *figure 6.3*. En effet, quand la tension d'entrée v est positive, les diodes D_2 et D_4 sont en polarisation directe et laissent passer le courant qui circule dans la charge tandis que les diodes D_1 et D_3 sont en polarisation inverse et sont donc à l'état bloqué. Par contre, lorsque la tension v est négative, les polarisations sont inversées : ce sont les diodes D_1 et D_3 qui sont conductrices et les diodes D_2 et D_4 qui sont bloquées. On retrouve donc aux bornes de la charge les deux alternances de la sinusoïde, mais la seconde est ramenée dans le même sens que la première. La *figure 6.4* illustre le principe de fonctionnement du redresseur en

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

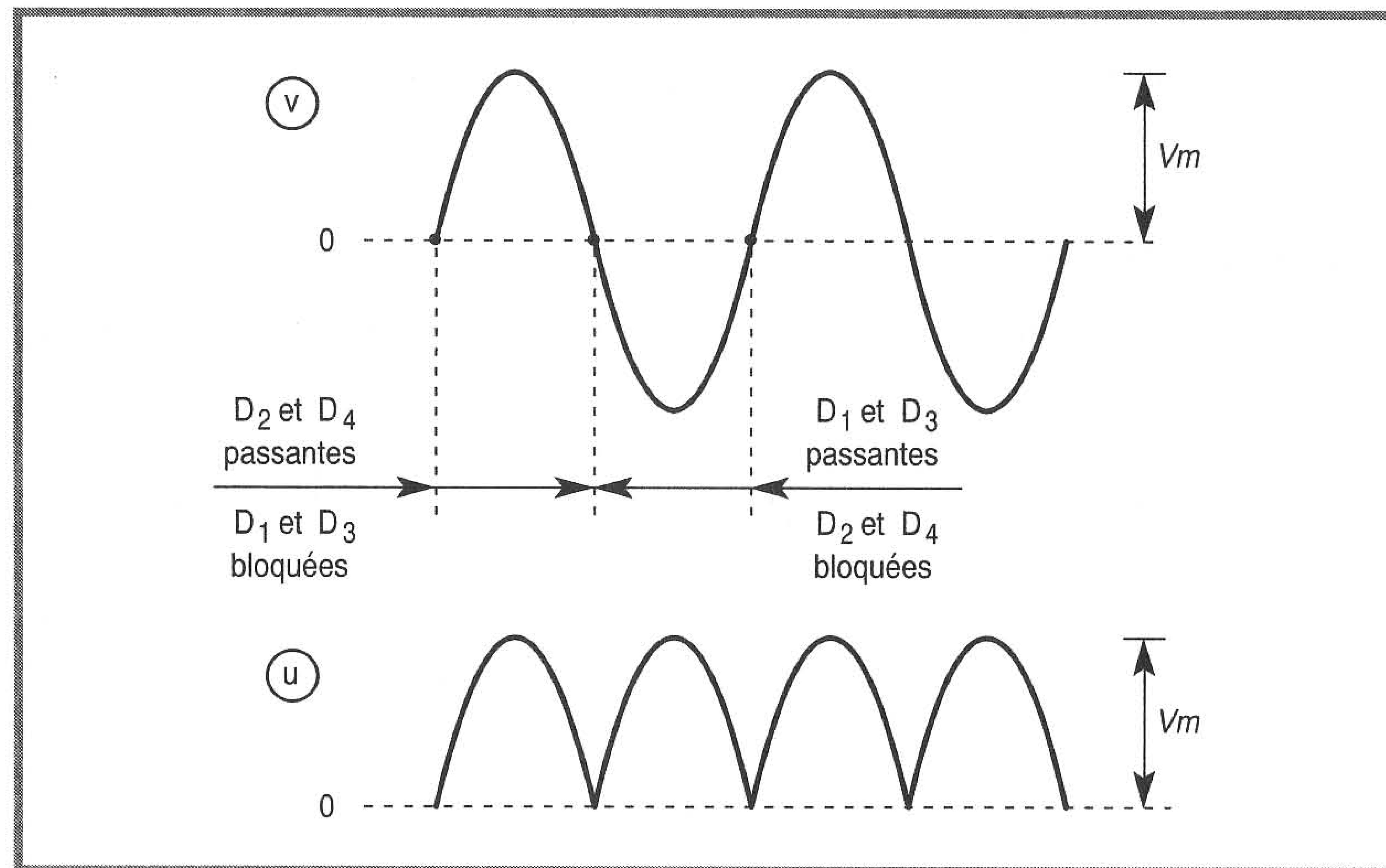


Figure 6.3 – Allure des tensions pour le redresseur en pont de Graetz avec charge résistive.

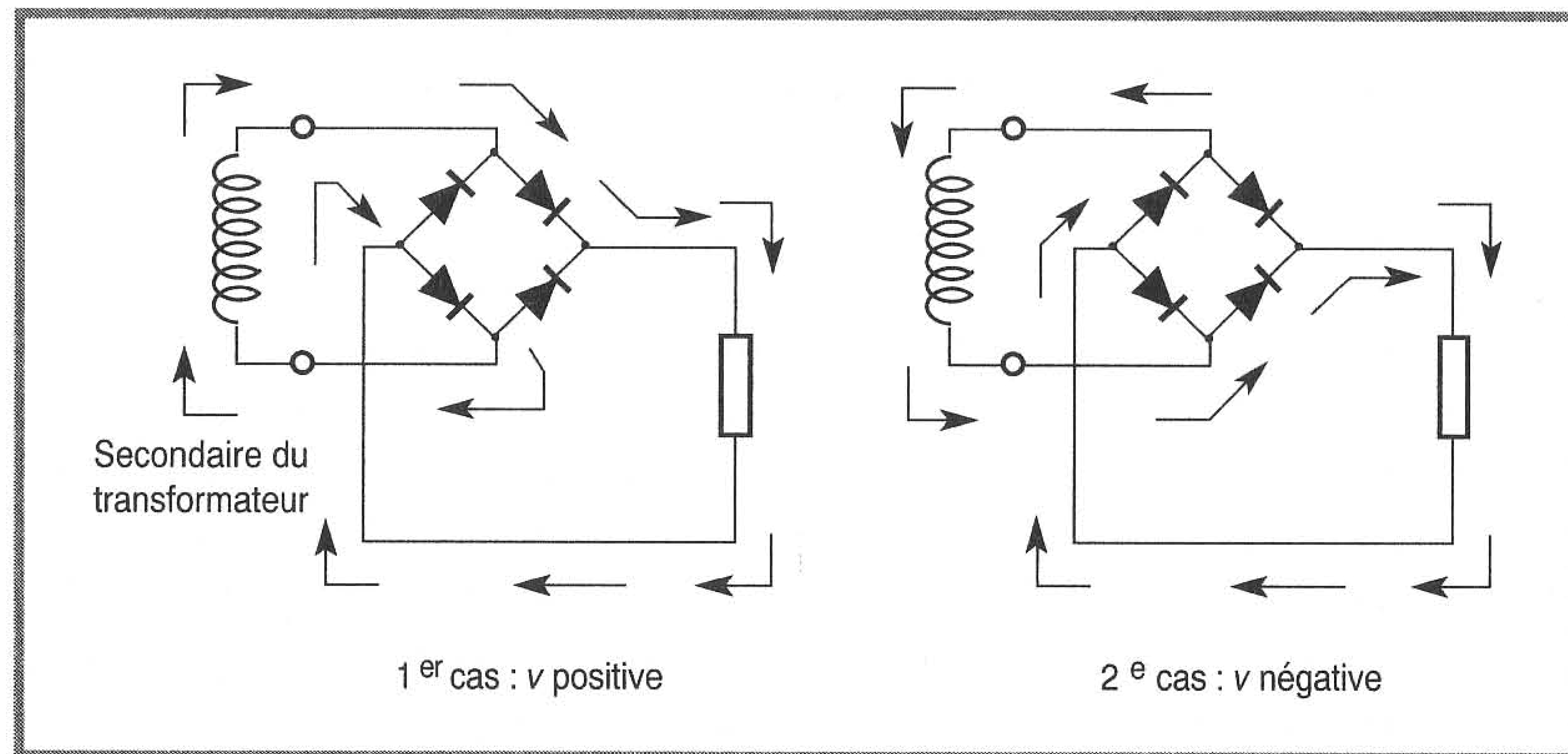


Figure 6.4 – Parcours du courant dans le redresseur sur charge résistive.

pont de Graetz sur charge résistive, en distinguant les deux cas que l'on vient de décrire.

Filtrage

La tension redressée a une composante continue mais présente aussi une ondulation importante. La fréquence du signal est 100 Hz puisqu'il y a deux motifs identiques dans chaque période de la tension de départ à 50 Hz. Pour obtenir du continu, il faut éliminer, ou tout au moins réduire considérablement cette ondulation. C'est le rôle du condensateur de filtrage C. La présence d'une charge capacitive sur le redresseur en modifie le fonctionnement. Si aucun courant n'était débité après le condensateur (*figure 6.5*), ce dernier se charge sous la tension de crête à la mise sous tension puis reste ainsi chargé puisqu'il n'y a aucune possibilité pour la circulation du courant (*figure 6.6*). Si maintenant on branche une charge après le condensateur, celui-ci va se décharger périodiquement dans la charge (*figure 6.7* et *6.8*). La tension filtrée comporte encore une légère ondulation à 100 Hz qu'on appelle ronflement. L'ondulation est d'autant plus faible que la capacité *C* est élevée : c'est pour cela que le condensateur de filtrage est un élément chimique de forte capacité.

Régulation

La partie de montage comprenant le transformateur, les diodes et le condensateur de filtrage forme déjà une alimentation continue non régulée. La tension de sortie est bien continue (à condition que la capacité *C* soit suffisante), mais sa valeur dépend d'un certain nombre d'influences extérieures : le courant demandé à la sortie, la tension appliquée au primaire du transformateur, la température… Lorsqu'on désire avoir une tension suffisamment stable, il faut compléter le montage par un régulateur. Cette fonction peut être réalisée avec des composants discrets (diode Zener et transistor), mais on préfère en général aujourd'hui utiliser une solution totalement intégrée : il existe en effet des circuits intégrés à trois bornes qui assurent seuls la fonction régulation de tension continue. Le modèle choisi est le 78L05 ; c'est un régulateur 5 V qui peut fournir 100 mA. Il se présente en

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

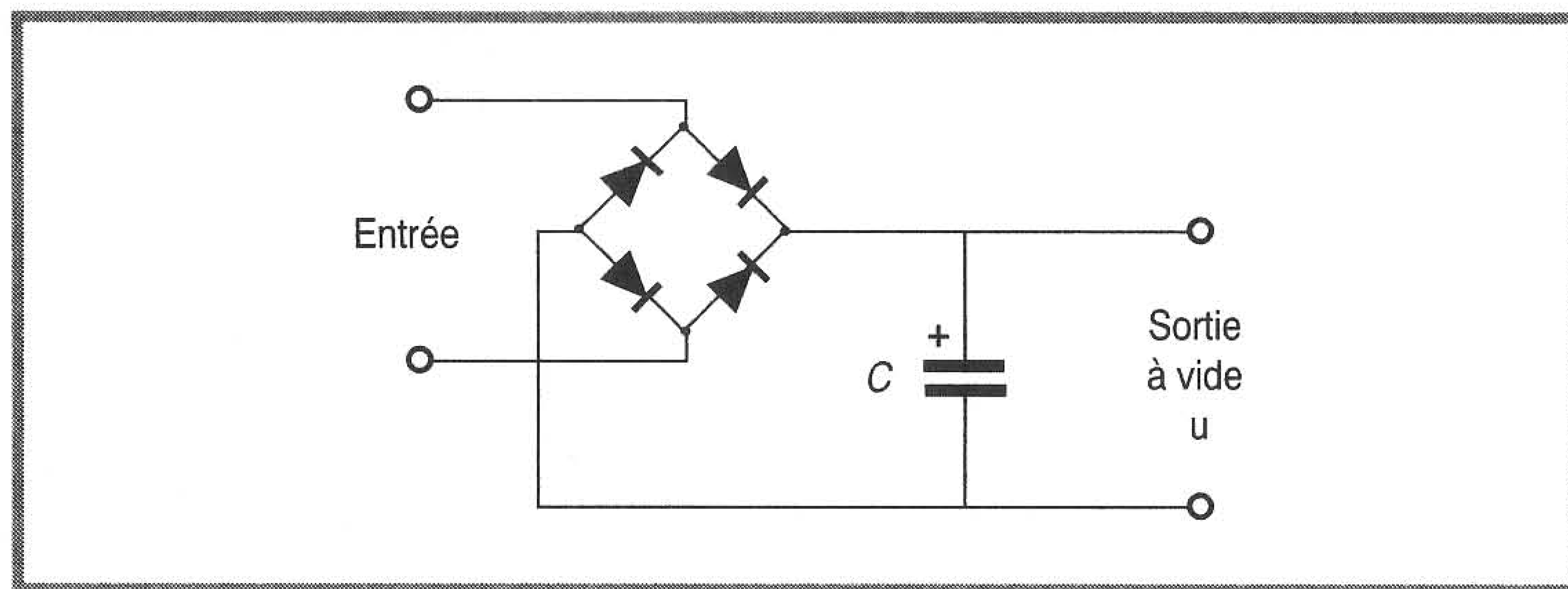


Figure 6.5 – Redresseur et filtre à vide.

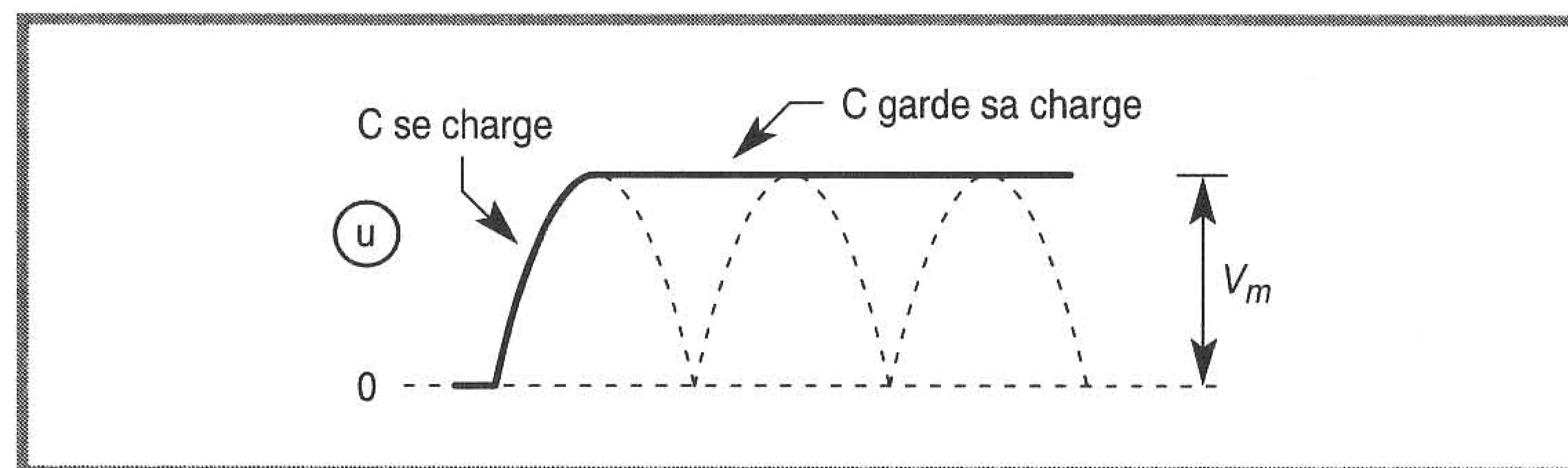


Figure 6.6 – Forme de la tension de sortie du redresseur avec filtre à vide.

boîtier TO-92, comme le montre la *figure 6.9.* On peut aussi utiliser le classique 7805 ; c'est aussi un régulateur 5 V, mais qui peut débiter plus d'un ampère si on le place sur un radiateur adéquat. Ce dernier modèle, présenté en boîtier TO-220 est toutefois surdimensionné pour l'application envisagée. Aucun composant externe n'est strictement nécessaire, mais deux condensateurs supplémentaires peuvent être utiles : C_1 permet un découplage qui est conseillé si le régulateur intégré se situe à une distance appréciable du condensateur de filtrage et C_2 améliore la réponse en régime transitoire. Ces deux condensateurs doivent être connectés au plus près du circuit intégré. Le régulateur fournit une tension continue bien stable, c'est-à-dire qui ne varie pra-tiquement pas en fonction des perturbations comme le courant débité et la tension d'entrée, à condition toutefois de respecter

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

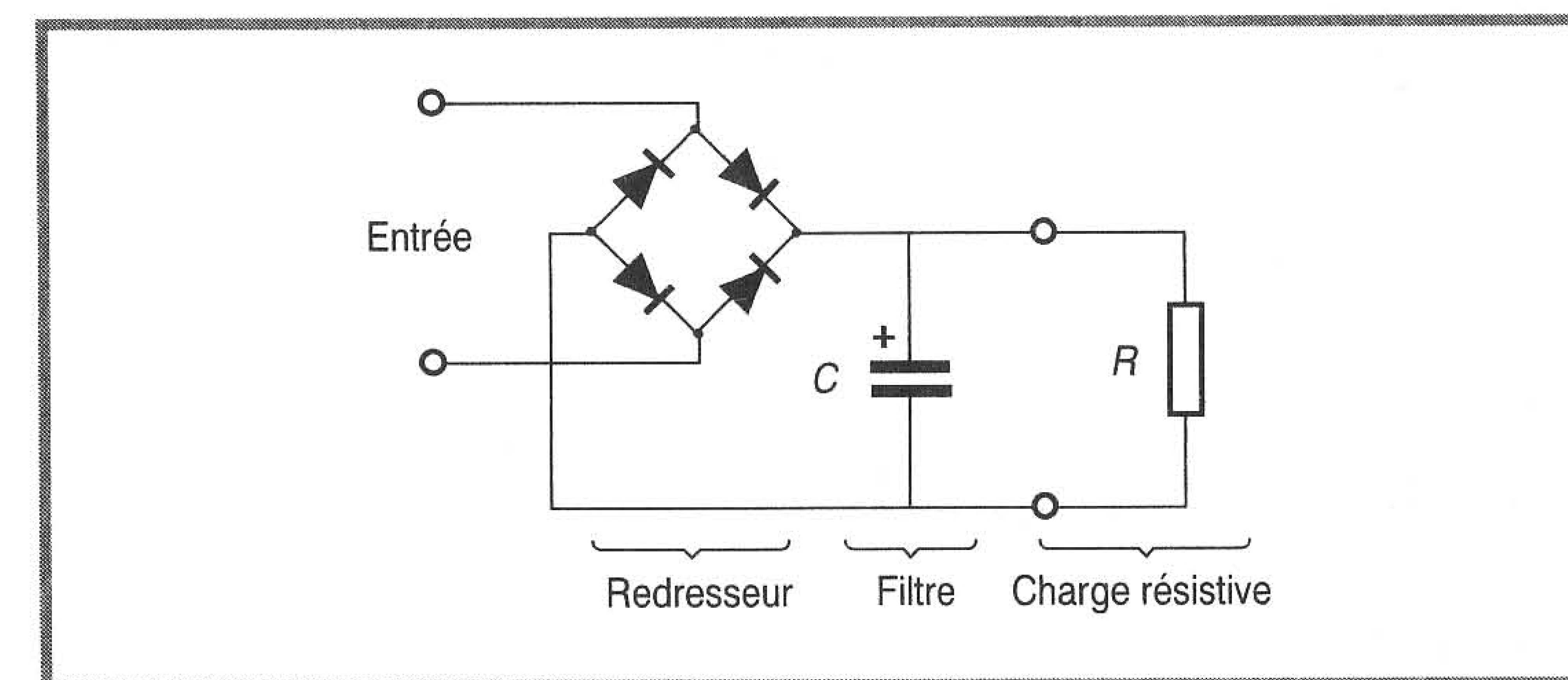


Figure 6.7 – Redresseur et filtre avec charge résistive.

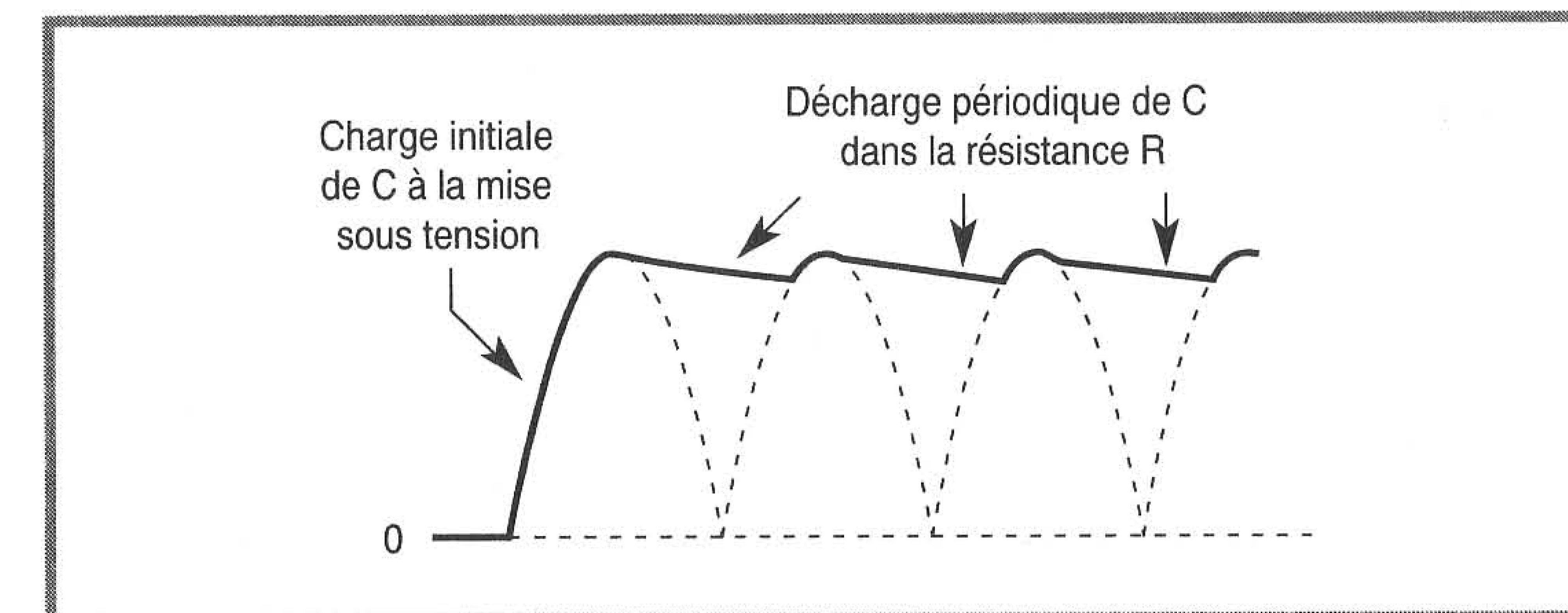


Figure 6.8 – Forme de la tension de sortie du redresseur avec filtre chargé.

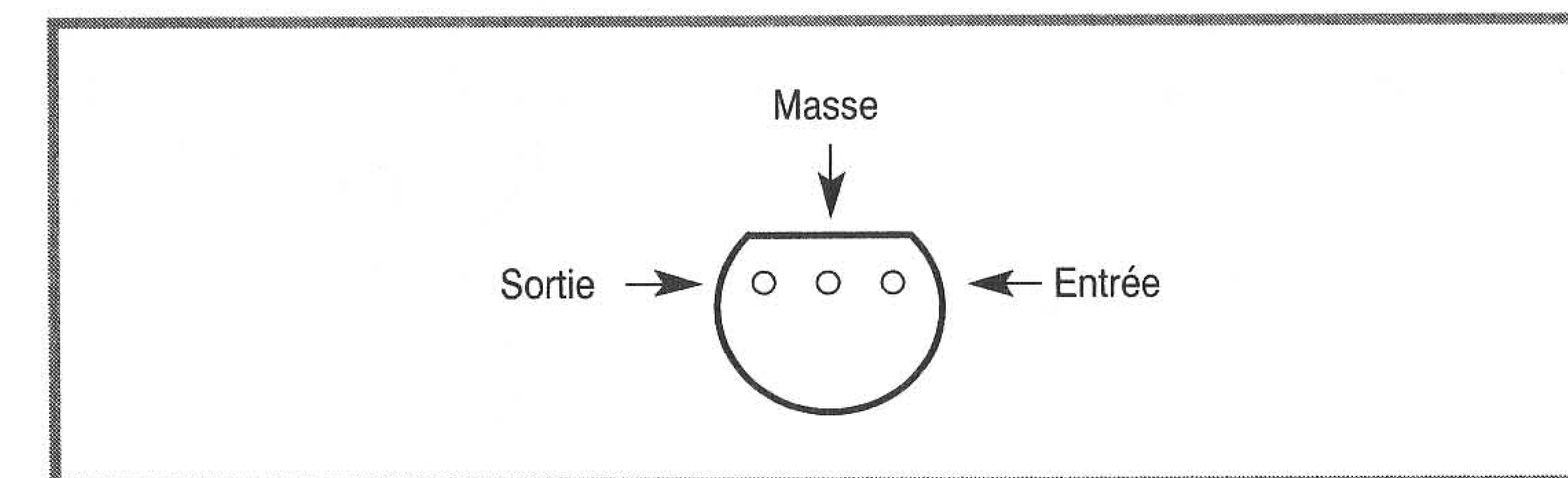


Figure 6.9 – Brochage du 78L05 (vue de dessous).

certaines limites. De plus, ce circuit réduit considérablement l'ondulation de la tension, ce qui autorise l'utilisation d'une capacité plus faible que dans une alimentation non régulée. Le circuit possède en outre une limitation interne qui facilite son emploi.

6.2 Choix des composants

Régulateur

Les deux paramètres essentiels du choix d'un régulateur intégré sont sa tension de sortie et le courant maximal qu'il peut fournir. Pour 5 V et 100 mA, le modèle 78L05 convient parfaitement.

Transformateur

Le primaire est branché sur le réseau : tension efficace 220 V, fréquence 50 Hz. Le secondaire doit alimenter le régulateur. Ce dernier demande une tension à ses bornes de l'ordre de 2 V pour fonctionner correctement. La tension filtrée obtenue aux bornes du condensateur C est une tension approximativement continue (avec une petite ondulation), dont la valeur est un peu inférieure à l'amplitude V_M de la tension au secondaire du transformateur à cause des seuils des deux diodes passantes qui se trouvent en série entre le transformateur et le condensateur dans chaque alternance. Le seuil d'une diode passante étant de l'ordre de 0,7 V, on peut estimer que la tension de crête aux bornes du condensateur C est $V_M - 1{,}4$. Pour tenir compte de l'ondulation de cette tension, on garde une marge de 1 V pour apprécier sa valeur moyenne. En résumé, le secondaire du transformateur doit fournir une tension dont l'amplitude est au moins :

$$V_M = 5 + 1{,}4 + 1 + 2$$

Tension de sortie (5) ; Seuil des diodes (1,4) ; Ondulation (1) ; Chute de tension aux bornes du régulateur (2)

ce qui donne $V_M = 9{,}4$ V. La valeur efficace correspondante est :

$$V_{eff} = 9{,}4/\sqrt{2} = 6{,}65 \text{ V}$$

Il faut choisir un transformateur fournissant une tension secondaire supérieure à cette valeur, avec une certaine marge de sécurité. On peut par exemple prendre un transformateur 220 V/9 V. Des valeurs plus petites peuvent aussi convenir, en réduisant les marges de sécurité adoptées.

Pour déterminer complètement le transformateur, il reste à fixer sa puissance apparente (ce qui équivaut à fixer le courant puisque la tension est déjà imposée).

On estime que l'intensité efficace I_{eff} au secondaire du transformateur doit pouvoir atteindre au moins une fois et demie le courant maximal de sortie de l'alimentation, soit ici :

$$I_{eff} = 0{,}15 \text{ A}$$

La puissance apparente du transformateur doit être supérieure à :

$$V_{eff} \cdot I_{eff} = 9 \times 0{,}15 = 1{,}35 \text{ VA}$$

La puissance apparente s'exprime en volt-ampère (symbole VA). On prendra par exemple dans les séries courantes un transformateur de 3 VA.

Diodes

Le premier paramètre de choix d'une diode est le courant moyen en direct qu'elle peut supporter. Ici, du fait de l'alternance de la conduction des deux groupes de diodes, la valeur moyenne du courant à considérer est la moitié du courant de sortie. En prenant une marge de sécurité importante, on choisit des diodes pouvant être traversées par le courant maximal de sortie 0,1 A.

Le deuxième paramètre important est la tension maximale en inverse. La tension présente aux bornes de deux diodes lorsqu'elles sont bloquées est au maximum égale à deux fois l'amplitude de la tension au secondaire du transformateur. Cette tension se partage

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

entre les deux diodes en série, mais pas en parties égales, comme on pourrait le prévoir théoriquement. On choisit donc une bonne marge de sécurité en prenant des diodes qui supportent la tension totale, soit ici :

$$2\,V_M = 2\,V_{eff}\sqrt{2} = 2 \times 9 \times \sqrt{2} = 25{,}5\text{ V}$$

Toutes les diodes de redressement courantes supportent facilement les contraintes qui viennent d'être chiffrées. On choisit donc le modèle classique 1N4004 qui est donné pour 1 A et 400 V. Les autres diodes de la série 1N4001 à 1N4007 conviennent aussi bien, elles ne diffèrent que par la tension inverse maximale qui varie suivant le modèle de 100 V à 1 000 V.

Condensateur de filtrage

La capacité du condensateur de filtrage doit être suffisante pour que l'ondulation de la tension soit assez faible.

Pour une alimentation non régulée, il faut donc se fixer un pourcentage d'ondulation tolérée dans le cahier des charges du montage.

Pour une alimentation régulée comme celle qui est envisagée ici, le taux d'ondulation de la tension aux bornes de C peut être plus élevé car le régulateur améliore beaucoup la qualité de la tension continue. On peut estimer de manière approchée que l'ondulation crête à crête ΔU (définie à la *figure 6.10*) est donnée par la formule :

$$\Delta U = \frac{I}{2Cf}$$

où I est le courant moyen débité et f la fréquence du signal alternatif (50 Hz en général). Dans le cas étudié, il faut éviter que la tension aux bornes du condensateur ne descende en dessous de 7 V pour garder une tension de 2 V aux bornes du régulateur intégré. La valeur maximale de la tension filtrée étant un peu inférieure à 13 V (plus précisément $9\sqrt{2}$ = 12,7 V), l'ondulation tolérable est de l'ordre de 5 V. La capacité minimale du filtre est donc :

$$C = \frac{I}{2f\Delta U} = \frac{0{,}1}{2 \times 50 \times 5} = 200\ \mu\text{F}$$

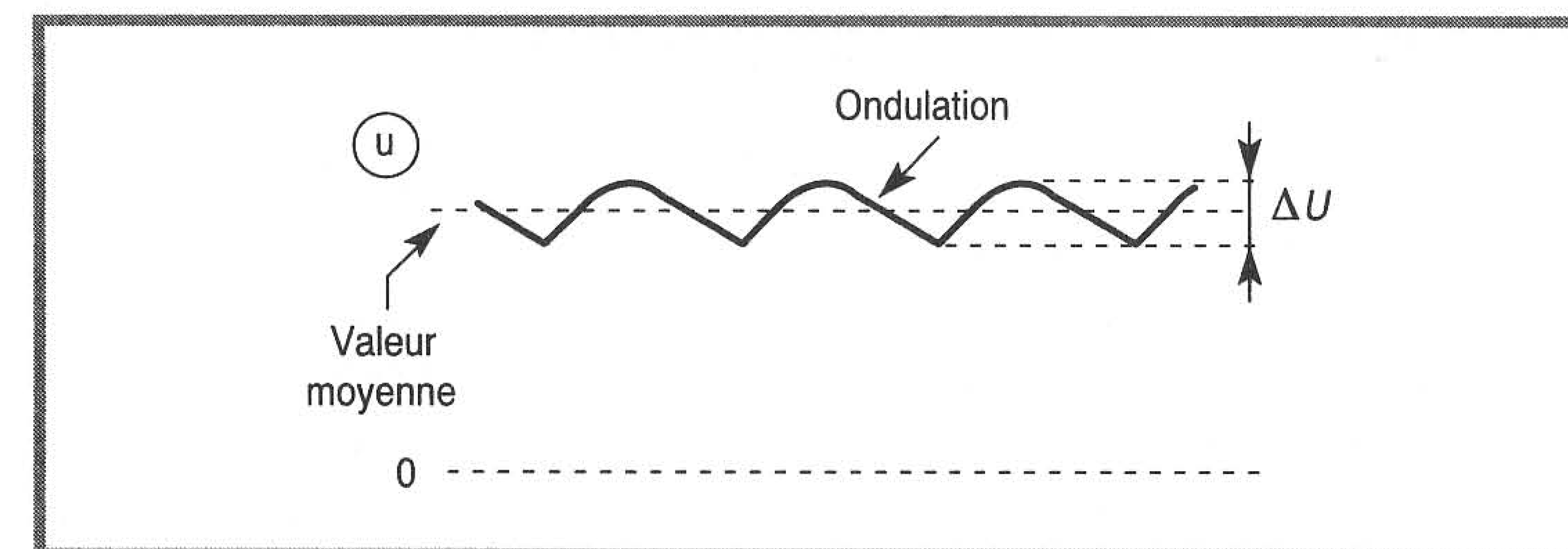


Figure 6.10 – Ondulation de la tension filtrée.

On choisit donc un condensateur chimique de 470 µF. Il faut prendre garde à la précision relativement mauvaise avec laquelle sont connues les capacités des condensateurs chimiques.

Dans le choix du condensateur, il faut également préciser la tension maximale. Celle-ci est la tension à vide du redresseur, soit ici 12,7 V. Avec une marge de sécurité, on adopte un condensateur de tension maximale 25 V. La valeur précédente, 16 V, serait possible, mais un peu juste.

Fusible

Pour un transformateur idéal (rendement 100 %), la puissance apparente au primaire est égale à la puissance apparente au secondaire. Le courant maximal consommé par le transformateur sur le réseau est donc :

$$I_1 = \frac{9 \times 0{,}15}{220} = 0{,}006\text{ A}$$

En réalité, les petites transformateurs sont assez éloignés de l'idéal, leur rendement est relativement médiocre et le courant au primaire sera donc supérieur à celui qui a été calculé plus haut. On a choisi ici un fusible de 0,1 A.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

6.3 Vérification du fonctionnement

On câble le montage en prenant un certain nombre de précautions : on repère bien les enroulements primaire et secondaire du transformateur, on fait attention au sens de branchement de chaque diode et surtout on vérifie soigneusement la bonne polarisation du condensateur de filtrage (la borne marquée + sur le schéma doit correspondre à la patte + du composant). En effet, l'inversion d'un condensateur chimique par rapport au sens prévu risque de le faire exploser et la projection des produits contenus dans le composant est dangereuse pour l'expérimentateur.

On peut ensuite procéder aux essais en branchant le primaire du transformateur sur le secteur. On observe les différentes tensions à l'oscilloscope. Toutefois, on prendra garde de ne pas mettre l'oscilloscope directement sur le secteur (pour voir la tension au primaire). En effet, la masse de l'oscilloscope est reliée à la terre par l'intermédiaire de sa prise secteur et le fait de connecter l'entrée de l'appareil sur une phase conduirait à un dangereux court-circuit. On pourra donc observer la tension au secondaire, la tension redressée et filtrée aux bornes du condensateur puis la tension continue régulée en sortie du montage.

On vérifie que la tension continue ne dépend pas du courant débité par l'alimentation (à condition évidemment de res-pecter le maximum prévu) en connectant des résistances de charge de plus en plus petites en sortie du régulateur. La valeur minimale de résistance de charge est celle qui donne le courant maximal, soit ici :

$$R_{min} = \frac{5}{0,1} = 50\ \Omega$$

COMPARATEUR

Un comparateur est un circuit dont la sortie ne peut prendre que deux valeurs, le basculement entre ces deux niveaux se faisant lors du passage de la tension d'entrée par un seuil choisi. Un amplificateur opérationnel peut jouer le rôle de comparateur, mais sa relative lenteur limite beaucoup son usage pour cette fonction. On fait donc souvent appel à un circuit intégré spécialisé nommé comparateur.

7.1 Description du schéma et choix des composants

On utilise le schéma de la *figure 7.1*. Le circuit intégré est associé à trois résistances.

Le comparateur choisi est le LM 311 fabriqué par plusieurs constructeurs (National Semiconductor, Texas Instruments...). Sa structure schématisée à la *figure 7.2* autorise une grande variété d'applications. On observe que l'émetteur et le collecteur du transistor de sortie sont accessibles et que ces points sont totalement indépendants de l'alimentation du comparateur. Cela permet une grande souplesse dans le choix des niveaux : on peut ainsi avoir des tensions d'alimentation différentes pour les circuits d'entrée et les circuits de sortie. Pour concevoir un schéma, l'utilisateur ne doit cependant pas oublier de polariser correctement le transistor de sortie à l'aide d'une résistance externe. L'entrée inverseuse est indiquée par un rond pour la différencier de l'entrée non inverseuse. Le deuxième petit rond présent après le triangle correspond à une inversion de signe compensant celle qui est amenée par le transistor de sortie.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

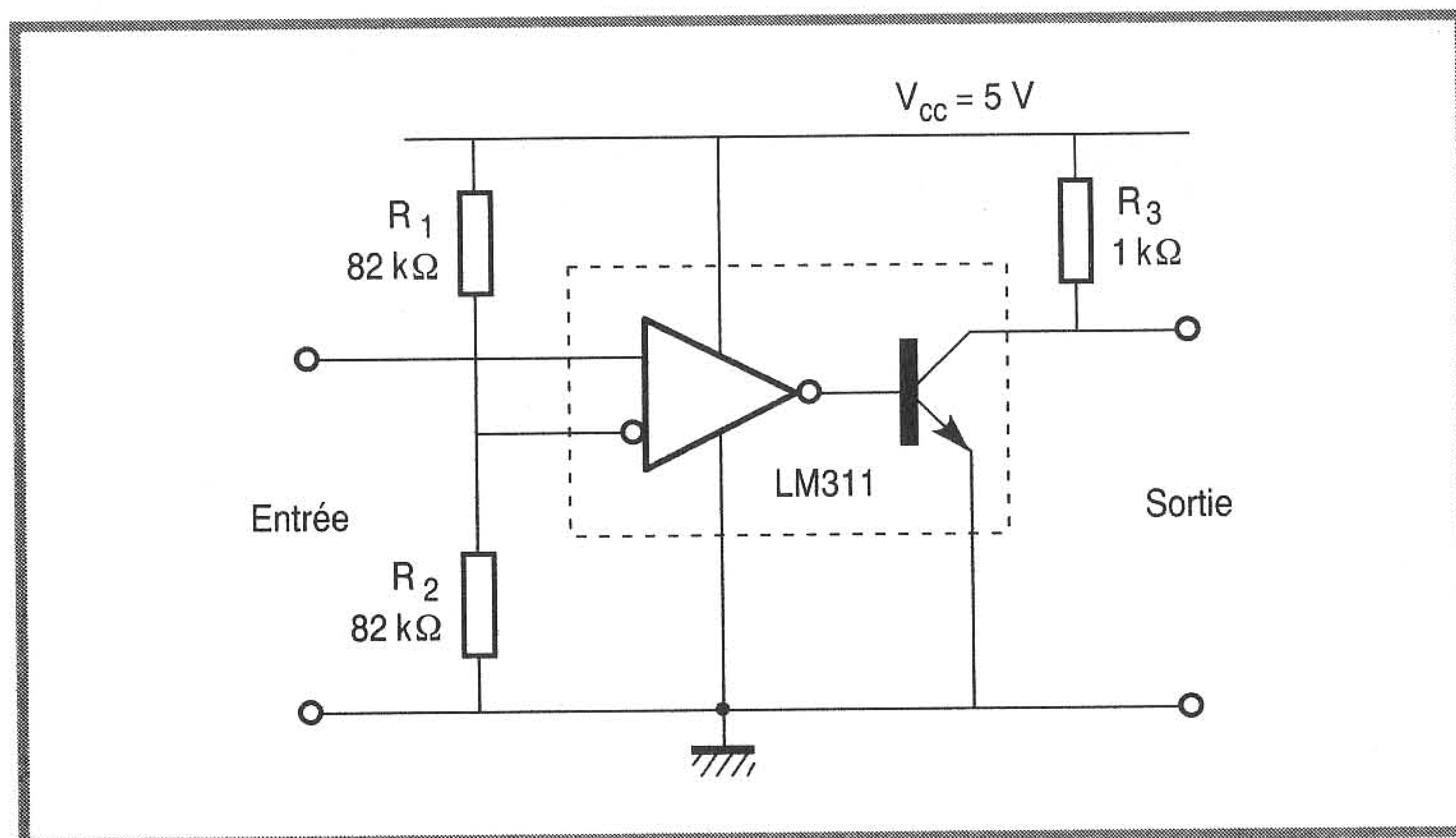


Figure 7.1 – Schéma du montage comparateur.

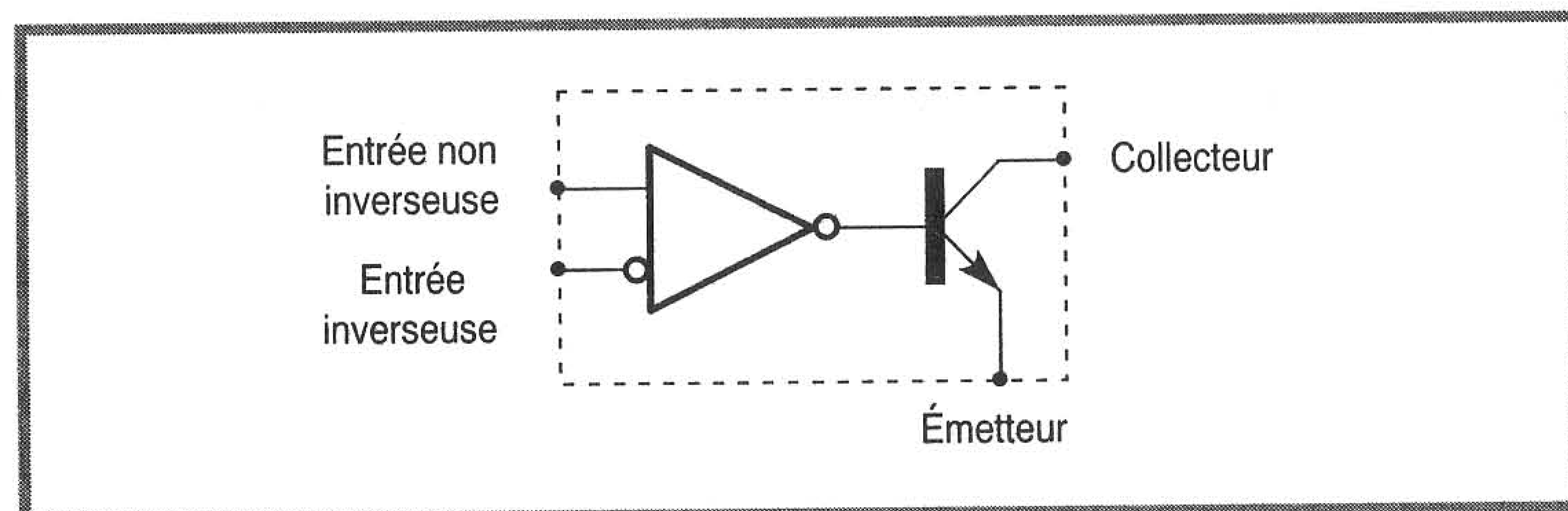


Figure 7.2 – Structure interne du circuit intégré LM 311.

Le brochage du circuit intégré dans son boîtier le plus courant est donné à la *figure 7.3*. On remarque la présence de bornes permettant la compensation du décalage ainsi qu'une entrée d'inhibition qui permet de bloquer le fonctionnement du comparateur. Ces bornes ne sont pas utilisées ici et seront laissées en l'air. On alimente le circuit intégré par une source de tension unique V_{CC} = 5 V. On obtient ainsi des niveaux de sortie 0 et 5 V, les tensions d'entrées ne pouvant varier qu'entre ces limites 0 et 5 V.

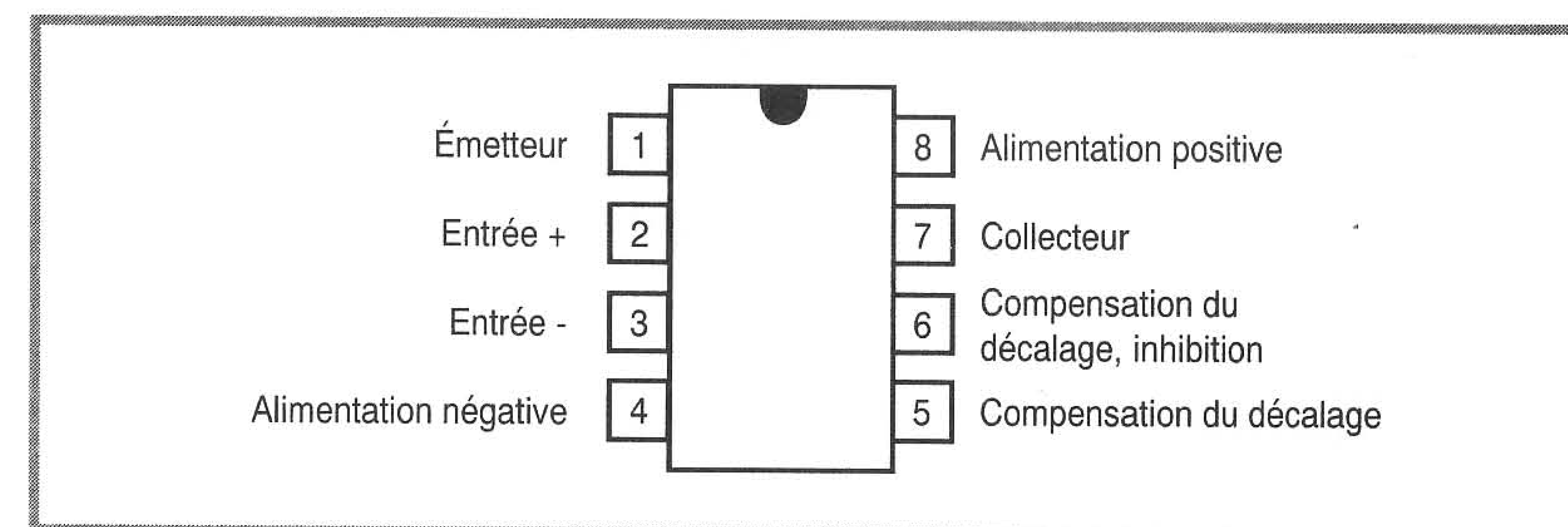


Figure 7.3 – Brochage du comparateur LM 311. Vue de dessus.

La borne alimentation négative sera donc reliée à la masse du montage de même que l'émetteur du transistor. Le collecteur est, lui, branché à l'alimentation positive par l'intermédiaire d'une résistance R_3. La valeur de R_3 est choisie en fonction de deux critères opposés : il faut une résistance suffisamment faible pour que le niveau haut ne chute pas trop quand on charge le montage (quand le transistor est bloqué, le courant traverse R_3), mais il ne faut pas prendre une valeur trop faible, sinon le courant serait important quand le transistor est saturé (état bas). Comme compromis, on a choisi dans notre cas $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$.

Les résistances R_1 et R_2 permettent de fixer le seuil de basculement du comparateur. La sortie du montage change d'état quand la tension sur l'entrée + atteint la valeur de la tension sur l'entrée –. Comme le courant d'entrée du circuit intégré est très faible, le diviseur de tension formé par R_1 et R_2 est à vide et on obtient une tension sur l'entrée inverseuse égale à :

$$v_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

Avec les valeurs numériques choisies (deux résistances égales), cette tension est la moitié de l'alimentation, soit :

$$v_- = 2{,}5\ \text{V}$$

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Comme l'entrée du montage se fait sur la borne + du circuit intégré, le comparateur est sans inversion : la sortie est à l'état haut si la tension d'entrée est supérieure au seuil et à l'état bas quand la tension d'entrée est inférieure à ce même seuil.

7.2 Vérification du fonctionnement

Le montage étant câblé conformément au schéma de la *figure 7.1*, on l'alimente par une source de tension continue 5 V. On relie à l'entrée le générateur de fonctions qu'on règle pour qu'il délivre une tension triangulaire variant entre 0 et 5 V (on utilise pour cela la commande de décalage du générateur). La fréquence est fixée à 1 kHz. L'oscilloscope branché à l'entrée et à la sortie du montage permet d'observer des courbes telles celles qui sont données à la *figure 7.4*. On constate que le basculement se produit bien pour un seuil de 2,5 V. Si un petit écart apparaît par rapport à cette valeur prévue, il est essentiellement dû à la tolérance sur les résistances R_1 et R_2. On le vérifie aisément en mesurant les valeurs précises des résistances à l'ohmmètre et en reprenant le calcul du seuil par la formule donnée plus haut. On peut procéder à l'essai de fonctionnement avec différentes formes du signal d'entrée à condition de rester dans les limites permises par le circuit intégré.

7.3 Limites d'utilisation

Courant de sortie maximal

Le circuit intégré LM 311 peut débiter environ 40 mA. Ce courant se partage entre la résistance de polarisation du collecteur du transistor et une éventuelle charge branchée entre la sortie et la masse (*figure 7.5*). Quand on utilise une charge de résistance de plus en plus faible, on constate que le niveau bas ne bouge pas tandis que le niveau haut descend peu à peu. Par exemple, avec une résistance $R = 1\ \mathrm{k\Omega}$, on mesure un niveau haut d'environ 2,5 V au lieu des 5 V que l'on avait à vide. Ce phénomène s'explique facilement. À l'état bas, le transistor

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

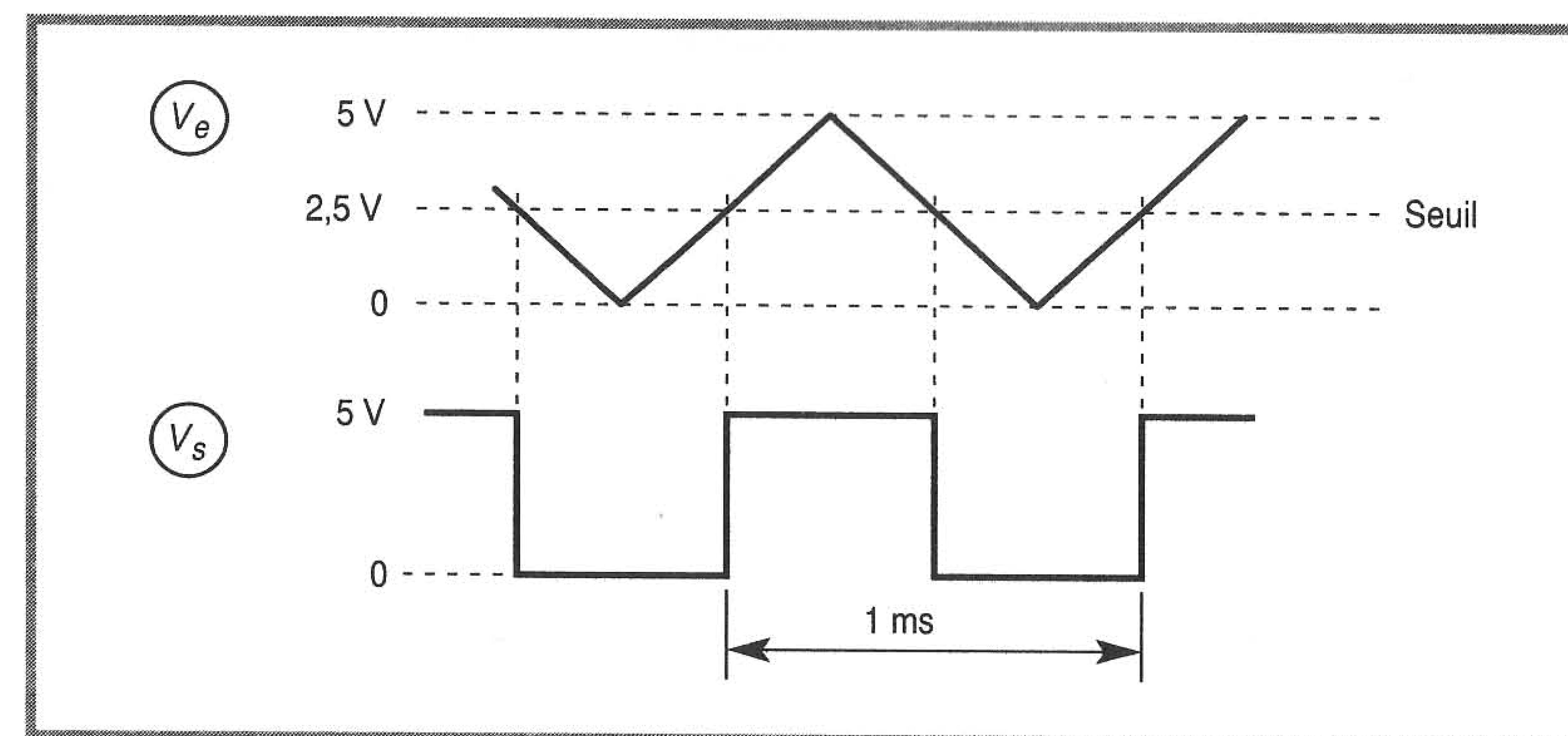


Figure 7.4 – Tensions d'entrée et de sortie du montage comparateur.

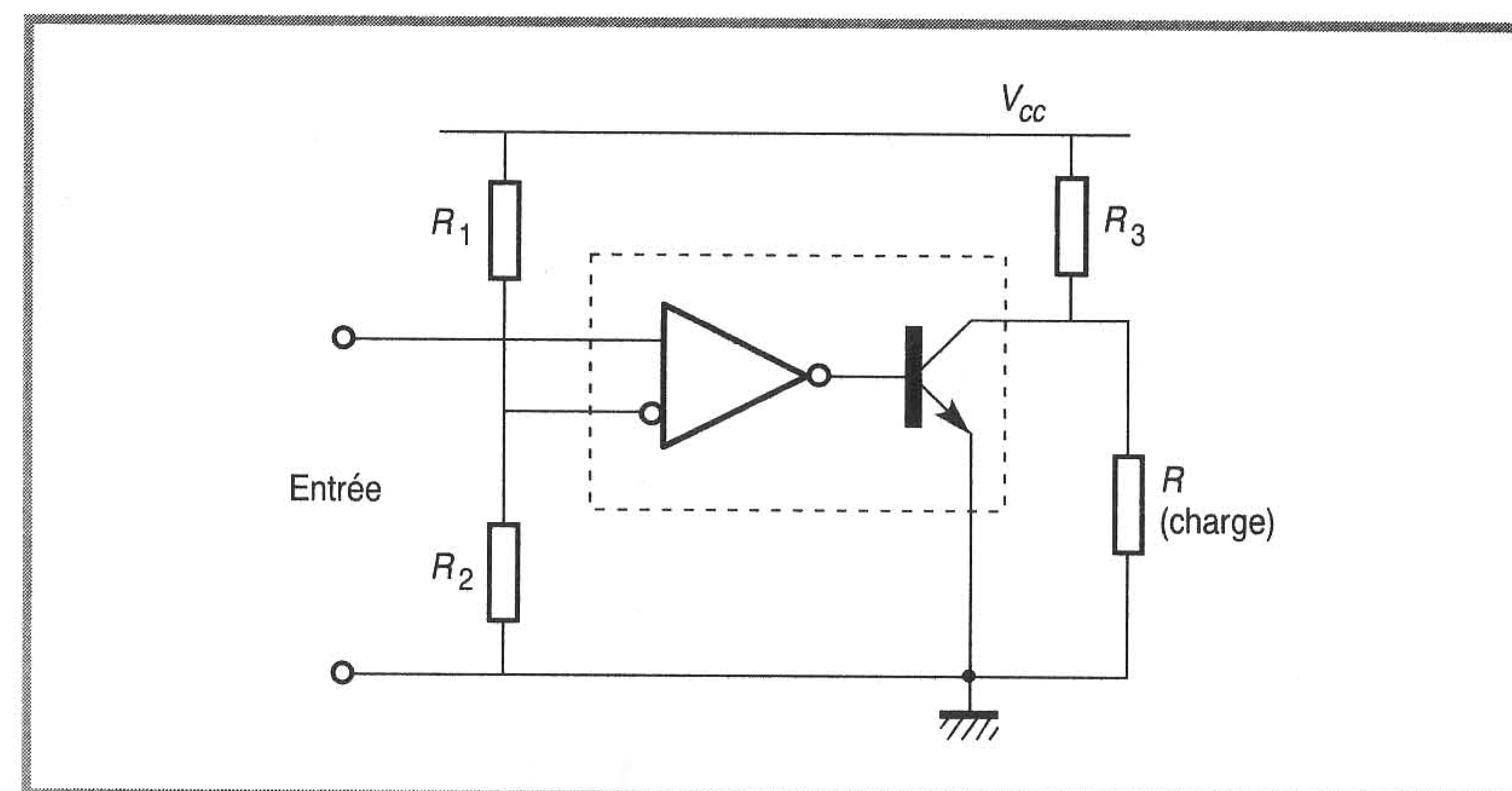


Figure 7.5 – Branchement d'une charge sur le comparateur.

de sortie est saturé : il se comporte donc pratiquement comme un court-circuit entre le collecteur et l'émetteur (il existe en fait une petite tension résiduelle de l'ordre de 0,2 V, mais celle-ci dépend peu du courant débité). Par contre, à l'état haut, le transistor est bloqué, il

n'est donc parcouru par aucun courant et le schéma de la maille de sortie est celui de la *figure 7.6*. La tension de sortie vaut alors :

$$v_S = \frac{R}{R+R_3}V_{CC}$$

Dans le cas particulier où $R = 1$ kΩ, on a bien :

$$v_S = \frac{1}{2}V_{CC} = 2{,}5 \text{ V}$$

Fréquence maximale

En augmentant progressivement la fréquence du signal d'entrée, on constate que la tension de sortie est encore sensiblement rectangulaire à plusieurs centaines de kilohertz, on observe simplement un arrondissement des fronts. En effet, un comparateur n'est pas soumis à un phénomène de *slew rate* (pente limite du signal de sortie) contrairement à un amplificateur opérationnel. À titre indicatif, les constructeurs précisent que le temps de réponse du circuit intégré est de 115 ns pour un passage de l'état bas à l'état haut et de 165 ns pour la transition inverse. Toutefois, ces valeurs sont valables dans des conditions bien déterminées : résistance de collecteur de 500 Ω, capacité de charge 5 pF... Les durées observées sont un peu plus importantes principalement à cause des capacités supplémentaires présentes en sortie du montage : capacités parasites de câblage et surtout capacités ramenées par les appareils de mesure. En effet, un oscilloscope a une capacité d'entrée de 20 à 50 pF et un câble coaxial ajoute une capacité d'environ 100 pF par mètre. On voit ici l'importance des conditions de mesure pour définir un paramètre par l'expérimentation.

7.4 Application

La *figure 7.7* représente le schéma d'un montage qui permet de transformer un signal de niveaux 0 et 30 V en un signal de niveaux 0 et 5 V, compatible avec les circuits logiques.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

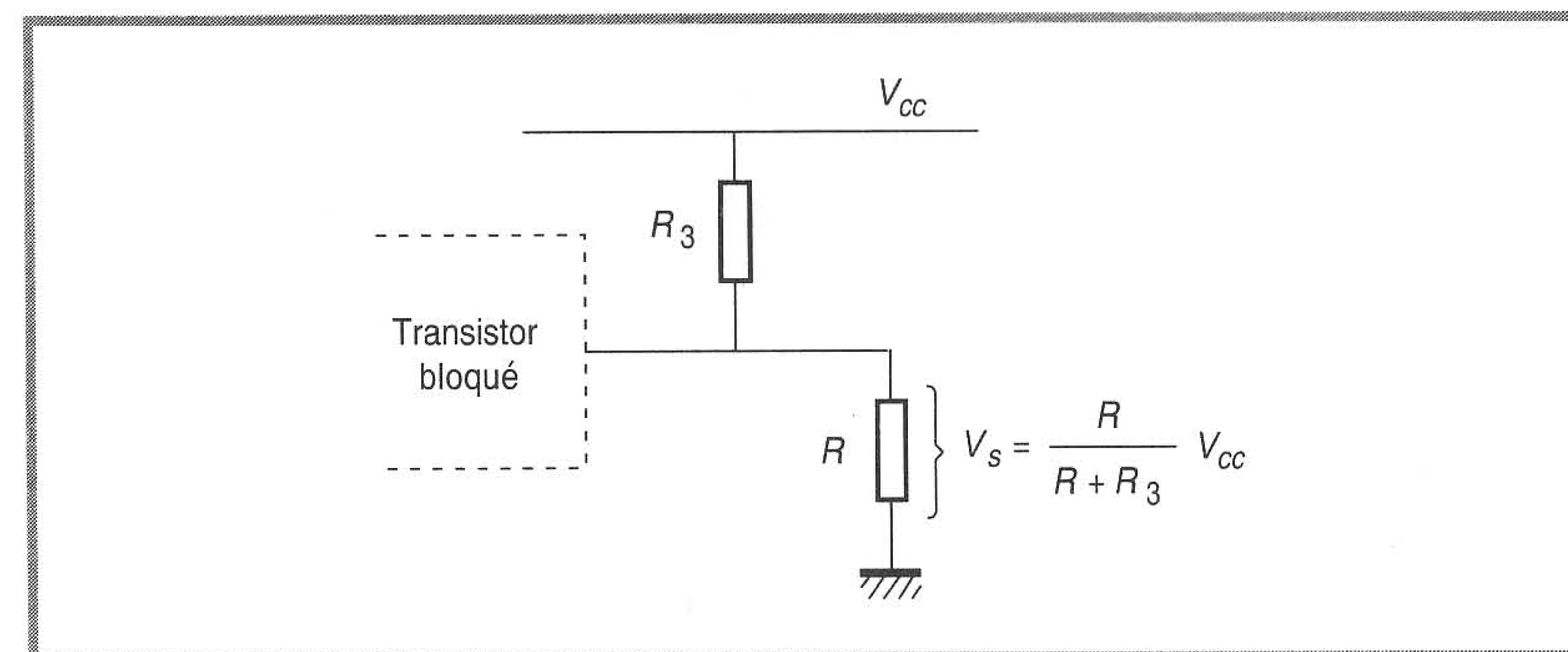


Figure 7.6 – Tension de sortie à l'état haut lorsque le comparateur est chargé.

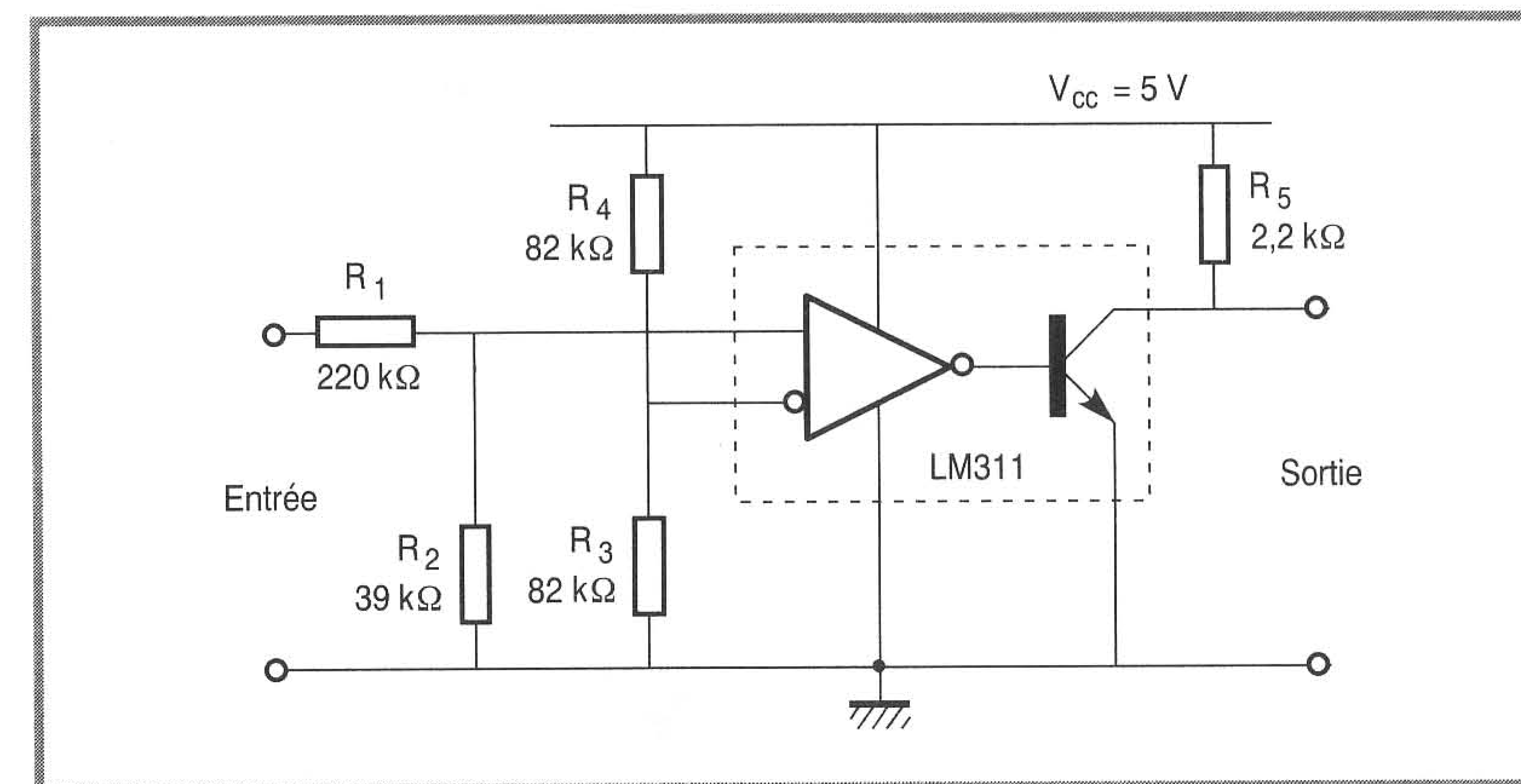


Figure 7.7 – Circuit d'interface permettant de transformer des signaux de niveaux 0 et 30 V en signaux de niveaux 0 et 5 V.

Pour obtenir les niveaux de sortie 0 et 5 V, on alimente le comparateur avec une source unique de tension 5 V. Le collecteur du transistor de sortie du circuit intégré est relié à l'alimentation par une

résistance R_5. Sa valeur de 2,2 kΩ forme un compromis entre un courant qui ne soit pas trop élevé quand le transistor est saturé et une chute de tension dans la résistance qui soit assez faible quand le transistor est bloqué et que l'on charge le montage. Les deux résistances identiques R_3 et R_4 fixent le seuil de la comparaison à la moitié de l'alimentation :

$$v_- = \frac{5}{2} = 2{,}5 \text{ V}$$

Le diviseur de tension formé par R_1 et R_2 ramène les tensions appliquées à l'entrée du circuit intégré à des valeurs compatibles avec les limites autorisées. Le niveau haut de 30 V est ainsi réduit à moins de 5 V puisque :

$$v_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_E$$

Soit numériquement :

$$v_+ = \frac{39}{220 + 39} \times 30 = 4{,}5 \text{ V}$$

Le basculement se produit quand les tensions présentes sur les deux entrées du comparateur sont égales :

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} v_E = \frac{V_{CC}}{2}$$

Ce qui correspond à une valeur de la tension d'entrée v_E :

$$v_E = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{V_{CC}}{2}$$

Numériquement, on a :

$$v_E = \frac{220 + 39}{39} \frac{5}{2} = 16{,}6 \text{ V}$$

L'évolution des tensions quand on applique un signal carré à l'entrée du montage est précisée à la *figure 7.8*.

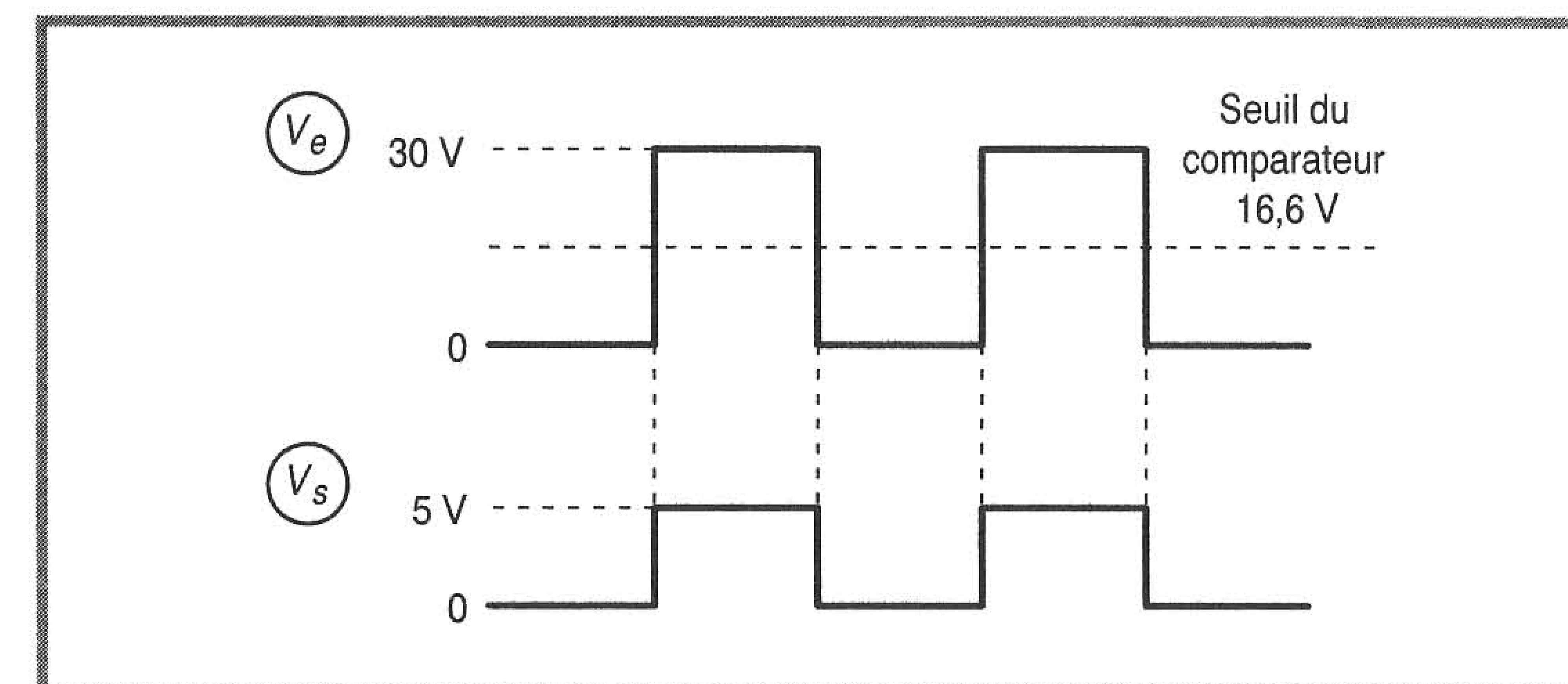


Figure 7.8 – Forme des tensions d'entrée et de sortie du circuit d'interface.

CHAPITRE 8

GÉNÉRATEUR DE SIGNAUX CARRÉS

Le signal carré est très fréquent dans les systèmes électroniques. De nombreux montages permettent de créer ce type de tension. On utilise dans ce chapitre un circuit intégré très courant qui donne un schéma simple et efficace.

8.1 Description du schéma et choix des composants

Le schéma du montage est représenté à la *figure 8.1*. On n'emploie qu'un circuit intégré, deux résistances et deux condensateurs (l'un d'eux étant d'ailleurs facultatif).

Le circuit intégré est un temporisateur (*timer*) 555. Il se présente en général sous forme d'un boîtier plastique DIL à 8 pattes dont le brochage est précisé à la *figure 8.2*. Suivant le constructeur, la référence exacte sera NE 555, LM 555... Le circuit doit être alimenté par une source continue simple dont la tension est comprise entre 4,5 et 16 V. On a choisi ici une valeur V_{CC} = 10 V. La notice du circuit propose un schéma fonctionnel qui permet de comprendre l'évolution des tensions dans le montage étudié. Ce schéma est représenté à la *figure 8.3*. On y distingue deux comparateurs dont les seuils sont fixés à $V_{CC}/3$ et $2V_{CC}/3$ par les résistances de 5 kΩ, une bascule dont les entrées sont attaquées par les sorties des comparateurs, un étage de sortie et un transistor de décharge commandé par la bascule. Les numéros indiqués sur le schéma correspondent à ceux du brochage de la *figure 8.2*.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

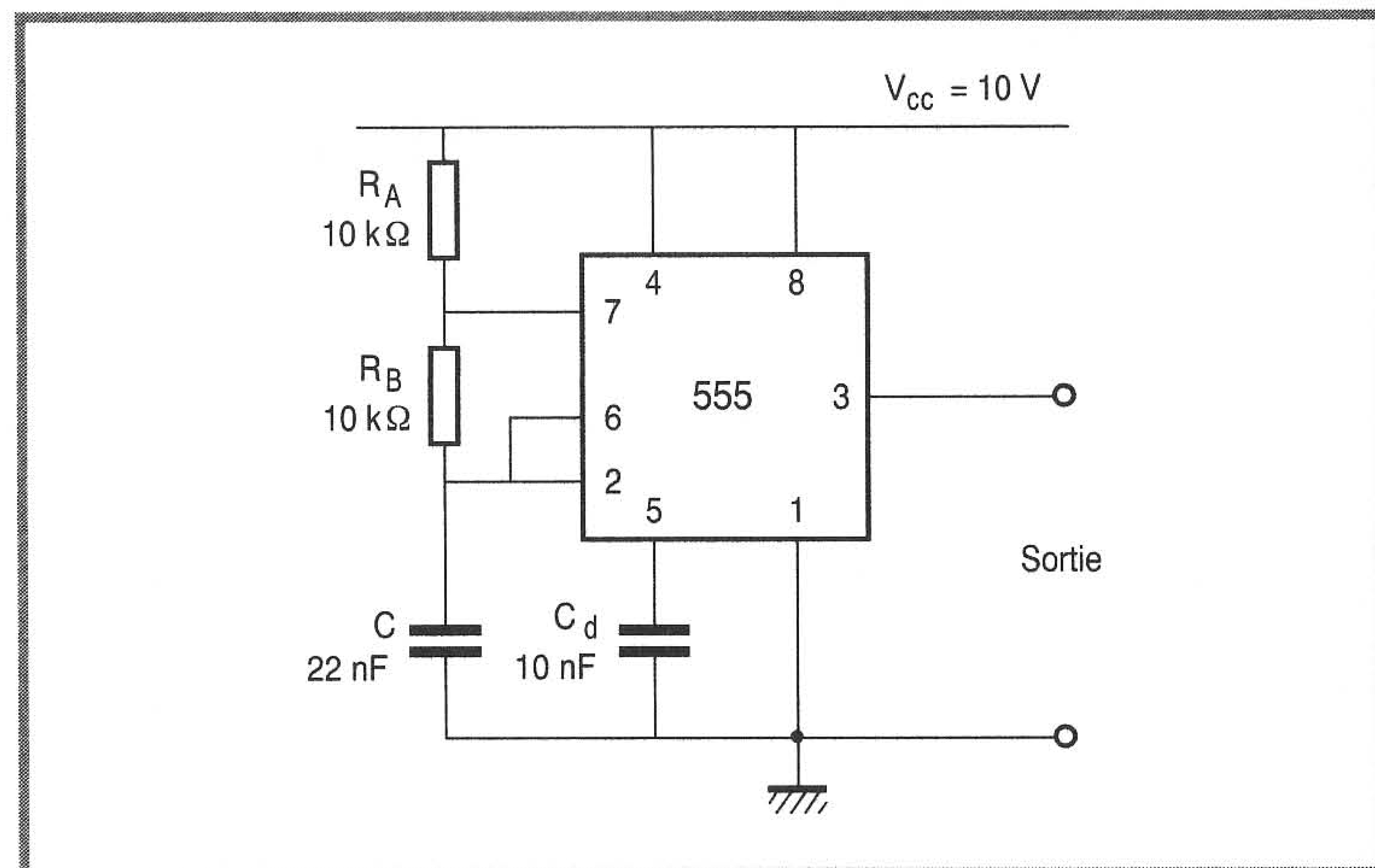


Figure 8.1 – Générateur de signaux carrés.

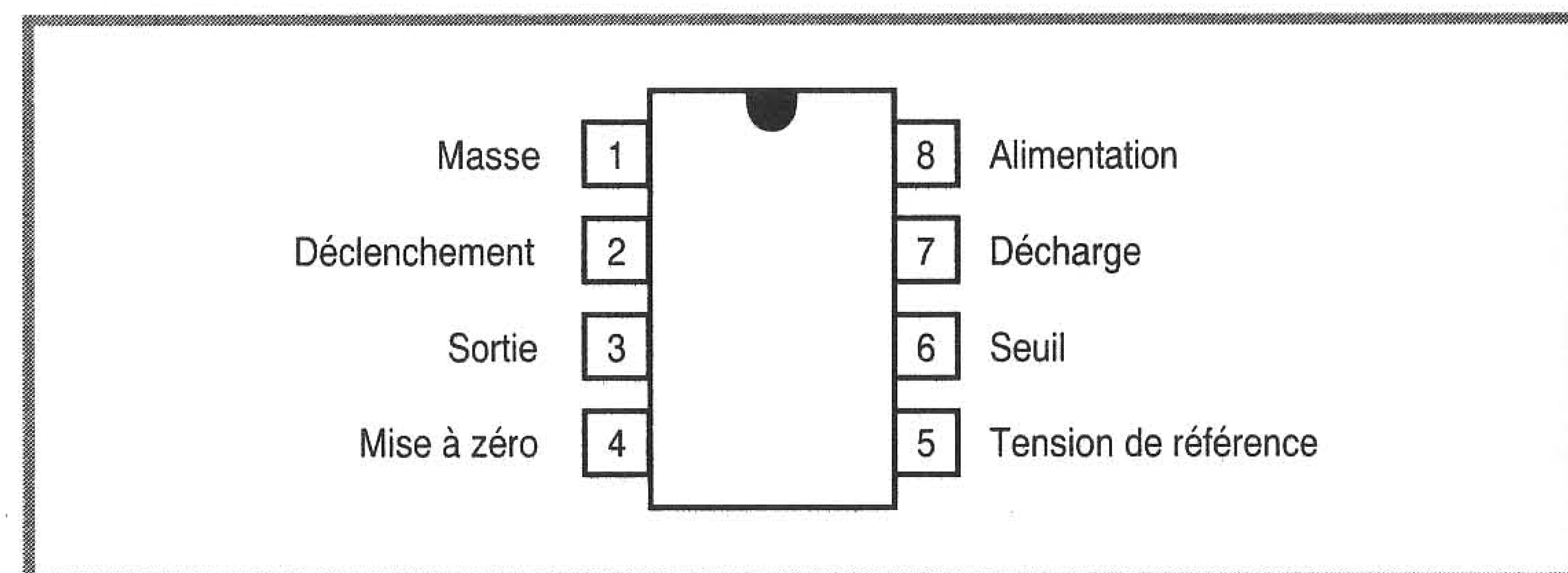


Figure 8.2 – Brochage du circuit intégré 555.

Pour étudier le fonctionnement du générateur, on observe l'évolution de la sortie v_S et de la tension v_C aux bornes du condensateur C. On construit ainsi progressivement les courbes de la *figure 8.4*. Le signal v_S ne peut prendre que deux niveaux, ceux-ci étant voisins de 0 et V_{CC}. On commence l'étude en se plaçant à un instant de basculement de la sortie de l'état bas vers l'état haut, le montage étant en

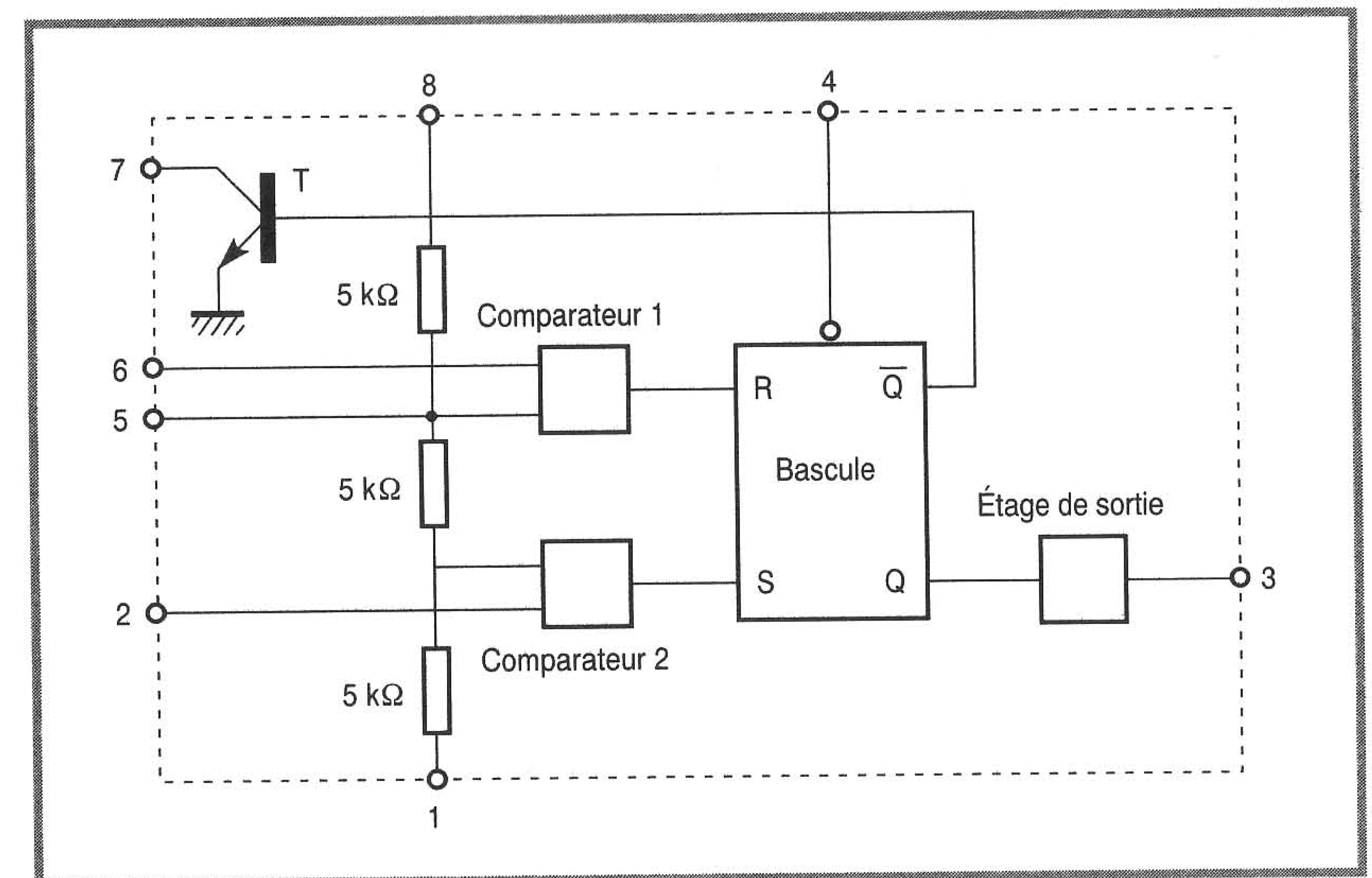


Figure 8.3 – Schéma fonctionnel du circuit intégré 555.

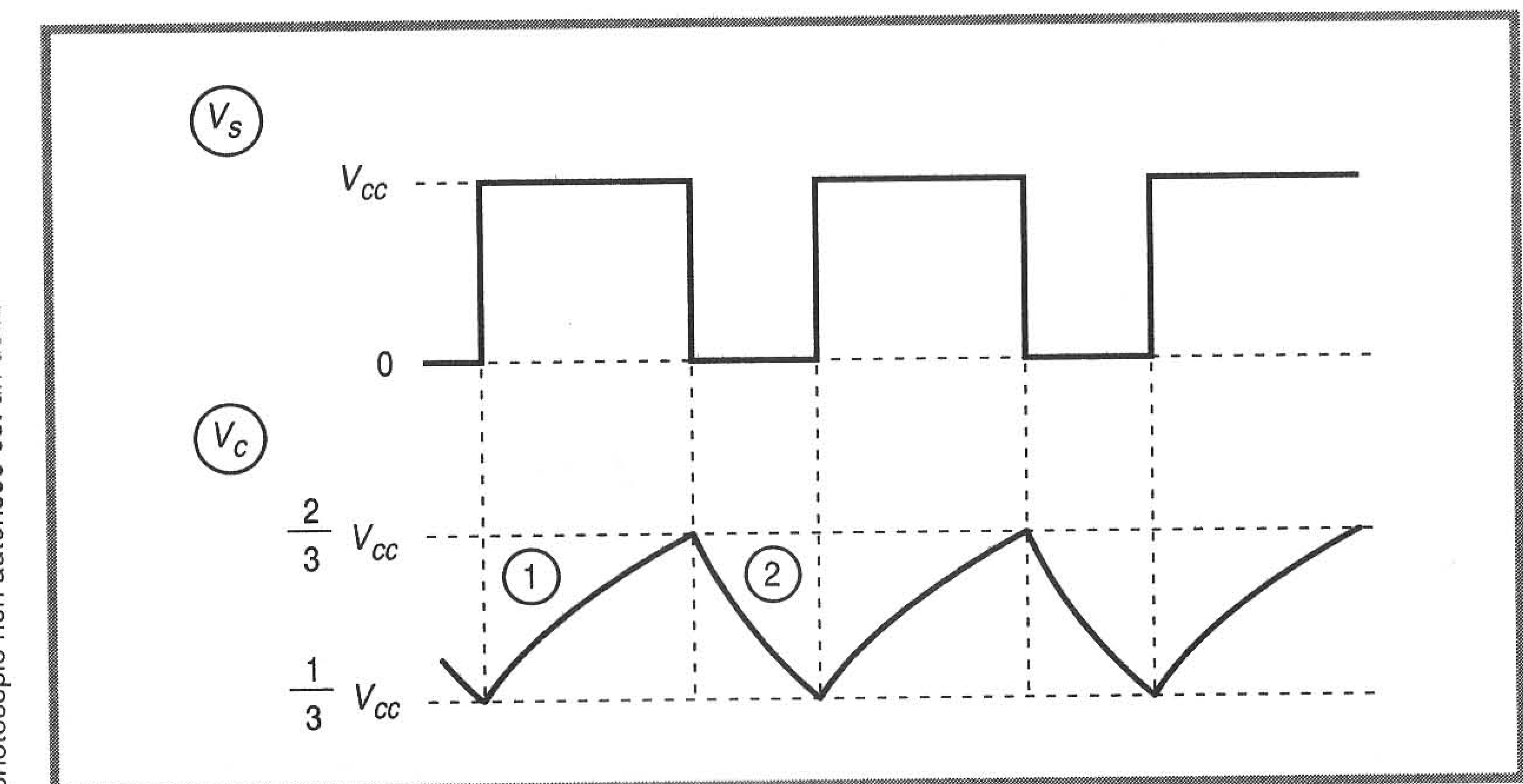


Figure 8.4 – Évolution de la tension de sortie v_S et de la tension v_C aux bornes du condensateur dans le montage de la figure 8.1.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

fonctionnement depuis un certain temps (c'est-à-dire qu'on considère le régime permanent sans tenir compte des phénomènes transitoires qui se produisent à la mise sous tension du circuit intégré).
Quand la sortie est à l'état haut, le transistor T est bloqué et donc le condensateur C se charge à partir de l'alimentation V_{CC} à travers les résistances R_A et R_B (phase 1 de la figure).
Quand la tension v_C aux bornes du condensateur C atteint le seuil $2V_{CC}/3$, le comparateur 1 change d'état. Son action sur l'entrée R (*reset* : remise à zéro) de la bascule entraîne la sortie à l'état bas. Le transistor T (relié à la sortie complémentée de la bascule) se sature et le condensateur C se décharge à travers R_B et T (phase 2 de la figure).
Lorsque la tension v_C atteint le niveau $V_{CC}/3$, le comparateur 2 change d'état. Son action sur l'entrée S (*set* : mise à 1) fait repasser la sortie à l'état haut. Le transistor T se bloque et le fonctionnement ultérieur est le même que dans la première phase. L'évolution des tensions est alors périodique : on obtient une succession ininterrompue de phases 1 et 2. La sortie fournit donc bien un signal carré comme on le souhaite.
Pour préciser les caractéristiques de cette tension, on donne sa fréquence $f = 1/T$ (T étant la période) et son rapport cyclique α (pourcentage de la durée de l'état haut par rapport à la période). Ces deux grandeurs sont définies sur la *figure 8.5*.

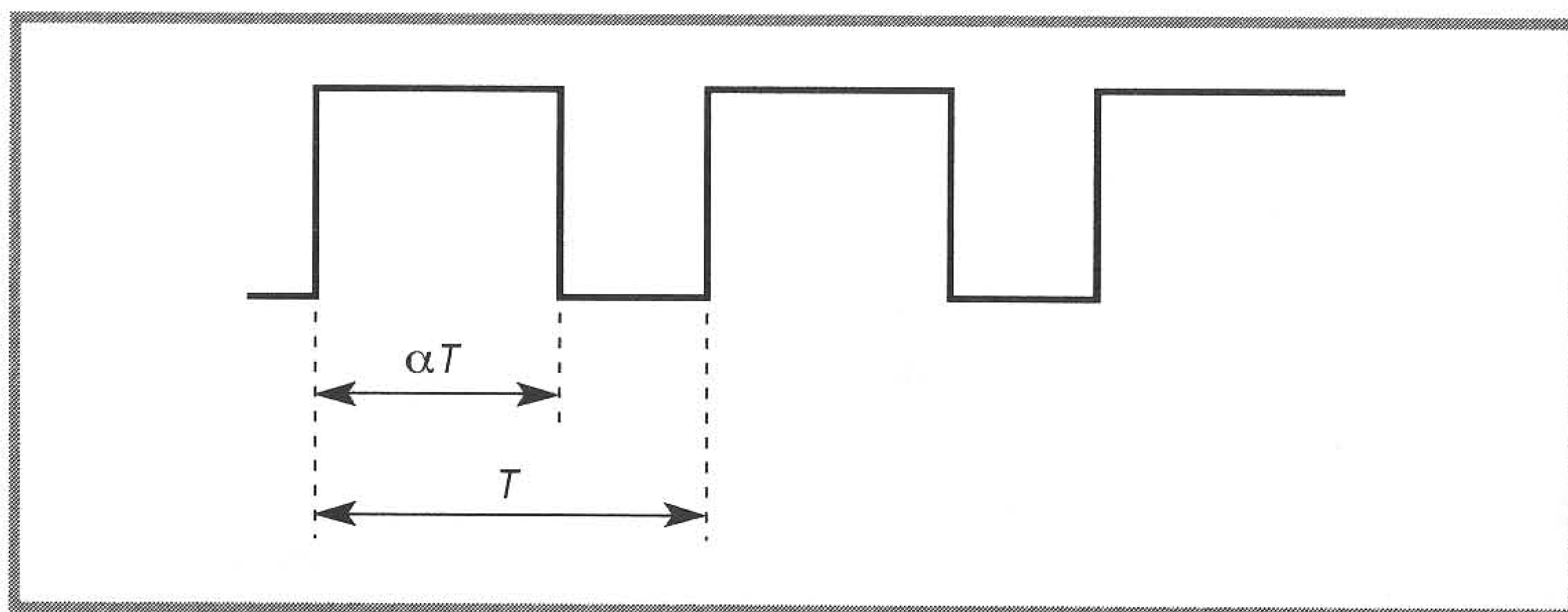


Figure 8.5 – Définition de la période T et du rapport cyclique α d'un signal carré.

Avec le montage employé, on a :

$$f = \frac{1{,}44}{(R_A + 2R_B)C}$$

et

$$\alpha = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B}$$

REMARQUE

On trouve parfois une expression différente pour le rapport cyclique. Il s'agit simplement d'une autre définition de ce paramètre : certains utilisent par exemple le pourcentage de la durée de l'état haut par rapport à la durée de l'état bas. Il faut donc faire attention à bien savoir de quoi on parle à chaque fois qu'il est question de rapport cyclique.

Avec les valeurs numériques choisies, on obtient :

$$f = \frac{1{,}44}{\left(10^4 + 2 \times 10^4\right) 22 \times 10^{-9}} = 2\ 190\ \text{Hz} \quad (2{,}19\ \text{kHz})$$

$$\alpha = \frac{10 + 10}{10 + 2 \times 10} = \frac{2}{3} = 67\ \%$$

Le condensateur C_D est recommandé pour que les seuils des comparateurs ne soient pas affectés par les fluctuations éventuelles de la tension d'alimentation (ce qui pourrait produire un basculement intempestif). La capacité généralement employée est 10 nF, mais cette valeur n'est donnée qu'à titre indicatif. L'usage de ce condensateur reste facultatif. Si son branchement n'est pas nécessaire, il suffit de laisser la broche 5 en l'air.
L'entrée de mise à zéro (borne 4) n'est pas utilisée ici. Comme elle est active à l'état bas, on la relie à l'alimentation.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

8.2 Vérification du fonctionnement

Le montage étant câblé, on l'alimente avec une source de tension continue de 10 V. L'oscilloscope, dont la première voie est branchée en sortie tandis que la seconde est placée aux bornes du condensateur, permet d'observer des courbes du type de celles de la *figure 8.4*. On mesure les niveaux remarquables des deux tensions et on constate que V_S prend deux valeurs, 0 et 10 V, alors que V_C évolue entre 3,3 V et 6,7 V. On relève également les durées des deux phases du fonctionnement : la sortie est à l'état haut pendant environ 30 ms et à l'état bas pendant 15 ms. Les valeurs réellement obtenues peuvent être légèrement différentes puisqu'elles dépendent des trois éléments R_A, R_B et C qui sont soumis à une certaine tolérance. À partir de la durée t_1 de l'état haut et de la durée t_2 de l'état bas, on peut calculer la fréquence f et le rapport cyclique α par les formules suivantes :

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

$$\alpha = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

On vérifie ainsi la validité des formules citées plus haut.

8.3 Limites d'utilisation

Courant de sortie maximal

Le circuit intégré 555 autorise des courants de sortie de l'ordre de 200 mA, ce qui permet d'attaquer directement de nombreuses charges. Cette limite est à comparer à celle que l'on obtient avec un amplificateur opérationnel (de l'ordre de 20 à 30 mA).

Fréquence maximale

Le constructeur donne une fréquence maximale de 200 kHz : au-delà, la dérive thermique devient importante. La fréquence obtenue dépend de la valeur des résistances R_A et R_B et de la capacité C.

Rapport cyclique minimal

Il est impossible d'obtenir un rapport cyclique inférieur ou égal à 50 % avec le montage de la *figure 8.1*. On peut toutefois approcher α = 50 % en choisissant R_B très grande devant R_A. On a en effet dans ce cas :

$$f \approx \frac{1{,}44}{2 R_B C}$$

et

$$\alpha \approx \frac{R_B}{2 R_B} = 0{,}5$$

On peut modifier le montage pour obtenir un rapport cyclique quelconque. Il suffit d'ajouter une diode comme l'indique la *figure 8.6*.

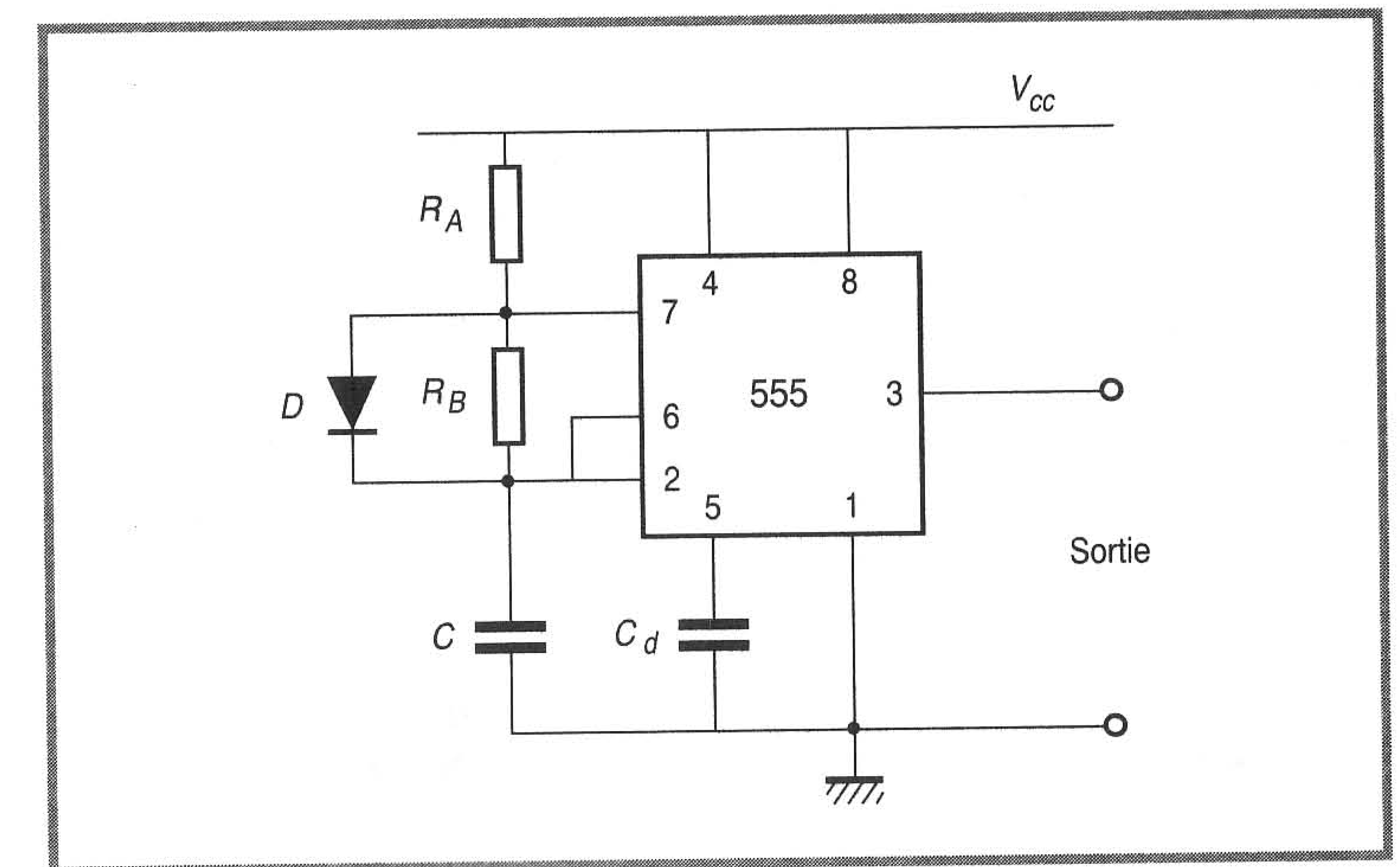


Figure 8.6 – Modification du schéma pour avoir un rapport cyclique inférieur à 50 %.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Lors de la charge du condensateur (phase 1), la diode D est passante et le courant circule dans la résistance R_A puis dans la diode (en fait une petite partie est dérivée dans R_B qui a une tension d'environ 0,6 V à ses bornes). Lors de la décharge du condensateur (phase 2), la diode D est bloquée et rien n'est modifié par rapport au fonctionnement du premier montage. Dans ces conditions, on obtient de nouvelles formules :

$$f = \frac{1{,}44}{(R_A + R_B)C}$$

et

$$\alpha = \frac{R_A}{R_A + R_B}$$

La valeur minimale du rapport cyclique n'existe plus.

8.4 Application

Le 555 se prête très bien à la réalisation de clignotants utilisant une diode électroluminescente (LED). Un schéma est proposé à la *figure 8.7*.

Pour avoir un clignotement régulier, on choisit un rapport cyclique voisin de 50 % en imposant une valeur de R_B beaucoup plus grande que celle de R_A. Si l'on désire obtenir un allumage par seconde (c'est-à-dire une fréquence de 1 Hz), on peut prendre par exemple :

$$R_B = 150 \text{ k}\Omega \quad \text{et} \quad C = 4{,}7 \text{ µF}$$

On calcule ainsi :

$$f = \frac{1{,}4}{2 \times 150 \times 10^3 \times 4{,}7 \times 10^{-6}} \approx 1 \text{ Hz}$$

La seule condition sur R_A est que sa valeur soit faible devant 150 kΩ. On choisit :

$$R_A = 1{,}5 \text{ k}\Omega$$

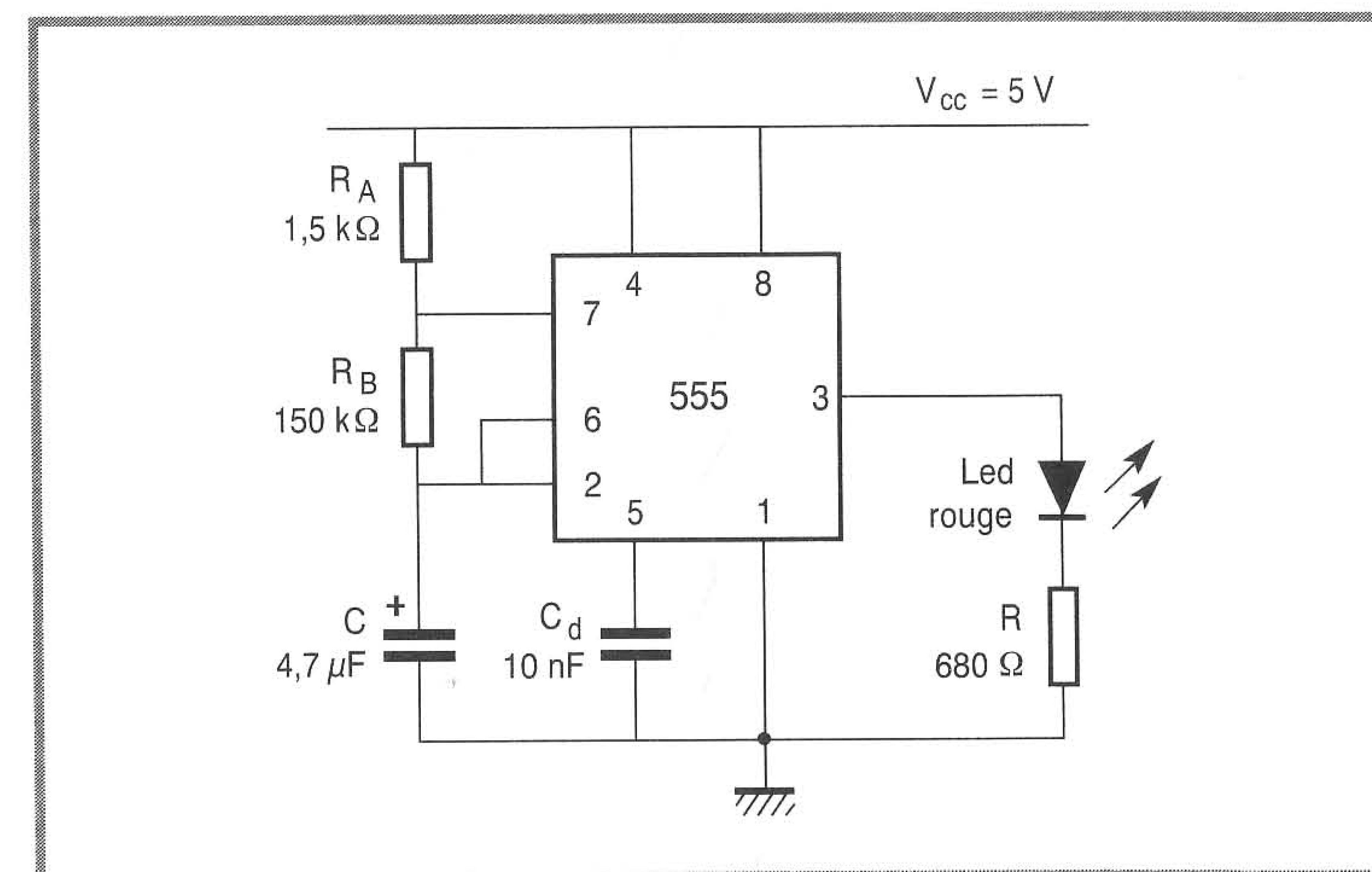


Figure 8.7 – Clignotant à LED.

Le courant dans la LED est fixé par la résistance R. La tension aux bornes d'une LED rouge est d'environ 1,6 V. Le courant nécessaire pour obtenir une luminosité correcte est de l'ordre de 5 mA. On calcule donc la valeur nécessaire pour la résistance R :

$$R = \frac{5 - 1{,}6}{5 \times 10^{-3}} = 680 \ \Omega$$

Si l'on estime que la luminosité obtenue est insuffisante, on peut diminuer la valeur de R pour obtenir un courant de 10 ou 20 mA.

On remarque que C est un condensateur polarisé, ce qui ne pose pas de problème ici car la tension aux bornes de cet élément garde toujours la même polarité.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

CHAPITRE 9

OSCILLATEUR SINUSOÏDAL

La tension sinusoïdale est le principal signal test de l'électronique. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour générer cette forme d'onde. Dans les générateurs de fonctions, on procède par mise en forme de la tension triangulaire par un circuit non linéaire. Dans d'autres appareils, on crée directement un signal sinusoïdal par oscillation d'un système bouclé. On étudie dans ce chapitre un exemple d'oscillateur à pont de Wien. Cette structure est celle que l'on rencontre le plus souvent pour les basses fréquences.

9.1 Description du schéma et choix des composants

L'oscillateur proposé est représenté à la *figure 9.1*. On utilise un amplificateur opérationnel, deux diodes, deux condensateurs, quatre résistances et un ajustable.

Le montage peut être considéré comme l'association d'un amplificateur et d'un filtre comme le montre la *figure 9.2*. Ces deux parties sont bouclées l'une sur l'autre, c'est-à-dire que la sortie de l'amplificateur attaque l'entrée du filtre tandis que la sortie du filtre est branchée à l'entrée de l'amplificateur.

Si le système est placé à la limite d'instabilité, la tension de sortie est sinusoïdale. La fréquence des signaux est imposée par les éléments R et C du filtre :

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

L'oscillation est obtenue à condition de respecter une relation entre les résistances R_1 et R_2 de l'amplificateur (R_2 étant constituée dans

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

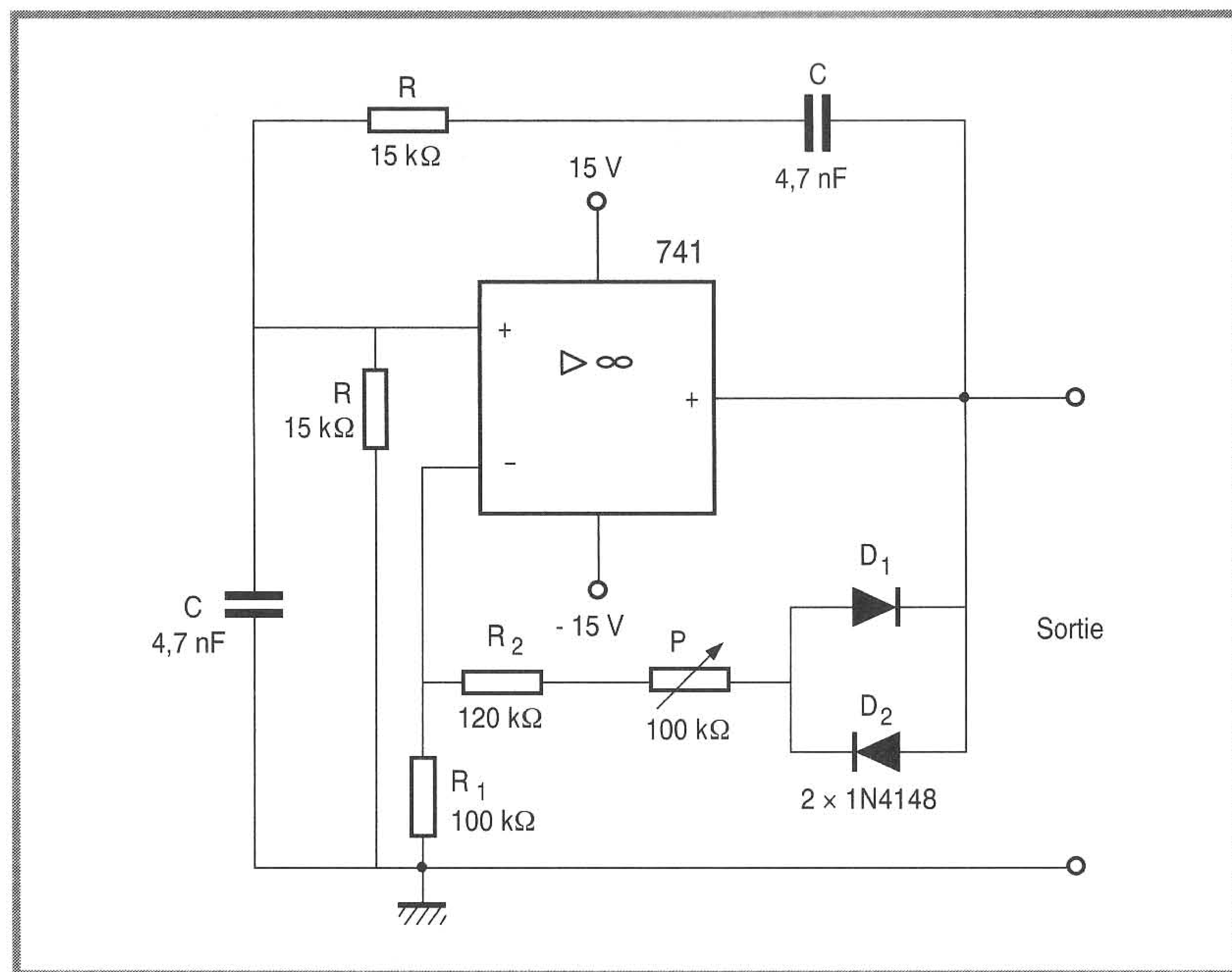


Figure 9.1 – Schéma de l'oscillateur à pont de Wien.

notre cas par la résistance fixe R′$_2$, l'ajustable P et la résistance apparente des diodes D_1 et D_2) :

$$R_2 = 2R_1$$

En réalité, il est très difficile de se maintenir exactement à la limite fixée par cette relation. Si la résistance R_2 devient inférieure à $2R_1$, les oscillations cessent.

On se place donc en pratique un peu au-delà de l'égalité : on choisit R_2 légèrement supérieure à $2R_1$. Les oscillations tendent alors à augmenter mais leur amplitude est limitée par les non-linéarités de l'amplificateur. Le signal reste sensiblement sinusoïdal grâce à l'effet du filtre.

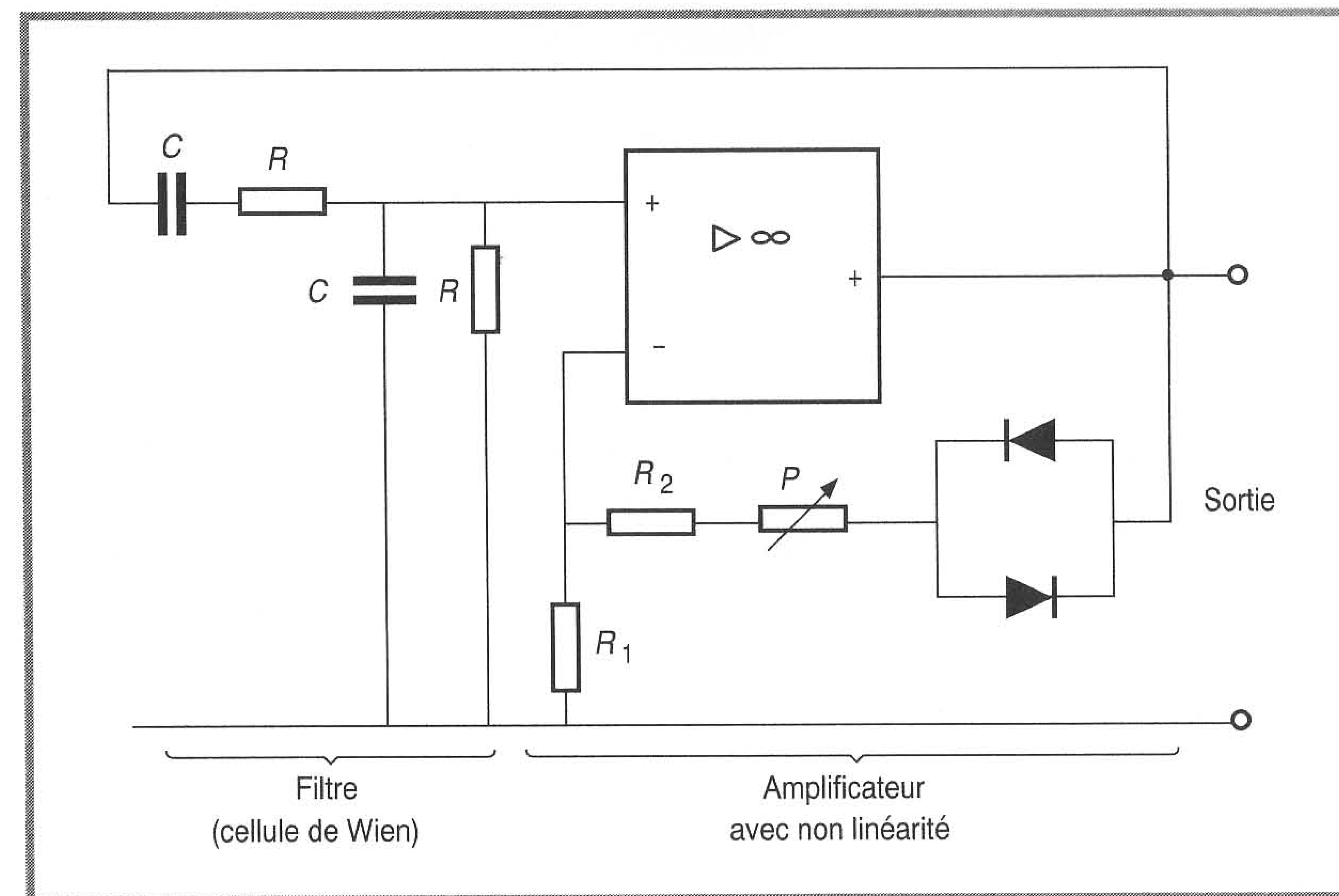


Figure 9.2 – Décomposition du schéma de l'oscillateur en deux parties : le filtre et l'amplificateur.

Pour fixer l'amplitude de la tension de sortie tout en permettant un fonctionnement stable de l'oscillateur, on introduit une non-linéarité artificielle dans l'amplificateur : c'est le rôle des deux diodes placées en série avec la résistance R′$_2$ et l'ajustable P dans notre exemple. Cette façon de fixer l'amplitude est très simple, mais la qualité du signal sinusoïdal obtenu est moyenne.

Dans les oscillateurs plus élaborés, on procède par commande automatique du gain de l'amplificateur, mais les circuits sont alors plus complexes.

L'ajustable P permet de procéder à un réglage de R_2 pour obtenir le meilleur compromis entre la qualité de la tension sinusoïdale et la stabilité du fonctionnement. L'amplitude de la tension de sortie dépend essentiellement des tensions d'alimentation (fixées ici à – 15 V et 15 V) et un peu du réglage exact de P.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

9.2 Vérification du fonctionnement

Le montage étant câblé suivant le schéma de la *figure 9.1*, on l'alimente avec deux sources de 15 V. Le potentiomètre étant dans une position quelconque, deux cas peuvent se produire à la mise sous tension.

Si la résistance R_2 est trop faible, les oscillations n'apparaissent pas et si la résistance R_2 est trop élevée, la tension de sortie est très distordue : on peut par exemple observer un signal de sortie du type de celui de la *figure 9.3*. On doit donc régler le potentiomètre P jusqu'à ce que l'on obtienne une sinusoïde de forme correcte, comme l'indique la *figure 9.4*. Il reste cependant toujours une très légère déformation à cause de la caractéristique non linéaire des diodes.

On mesure la période du signal et on en déduit la fréquence :

$$f = \frac{1}{T}$$

On obtient ici (aux tolérances près sur les composants) :

$$T = 0{,}44 \text{ ms}$$

donc :

$$f = 2{,}27 \text{ kHz}$$

Ce résultat correspond bien à celui de la formule citée au début du chapitre :

$$f = \frac{1}{2\pi \times 15 \times 10^3 \times 4{,}7 \times 10^{-9}} = 2{,}26 \text{ kHz}$$

Si l'on observe un petit écart entre le résultat expérimental et la formule théorique, il suffit de mesurer les valeurs de R et C et faire la correction nécessaire. Toutefois, pour que la formule soit valable exactement, il faut apparier les deux résistances R et les deux condensateurs C, c'est-à-dire effectuer un tri, par la mesure, afin de trouver des composants de valeurs très voisines.

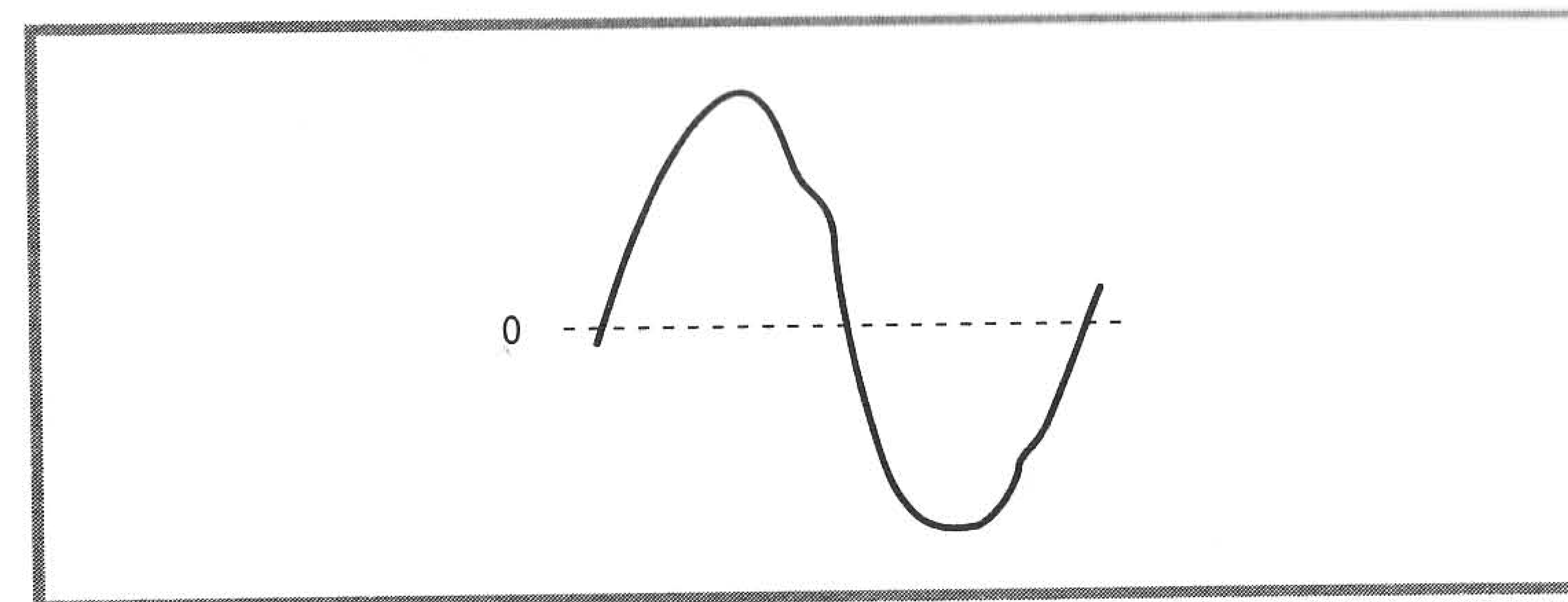


Figure 9.3 – Signal distordu pour un mauvais réglage du potentiomètre P.

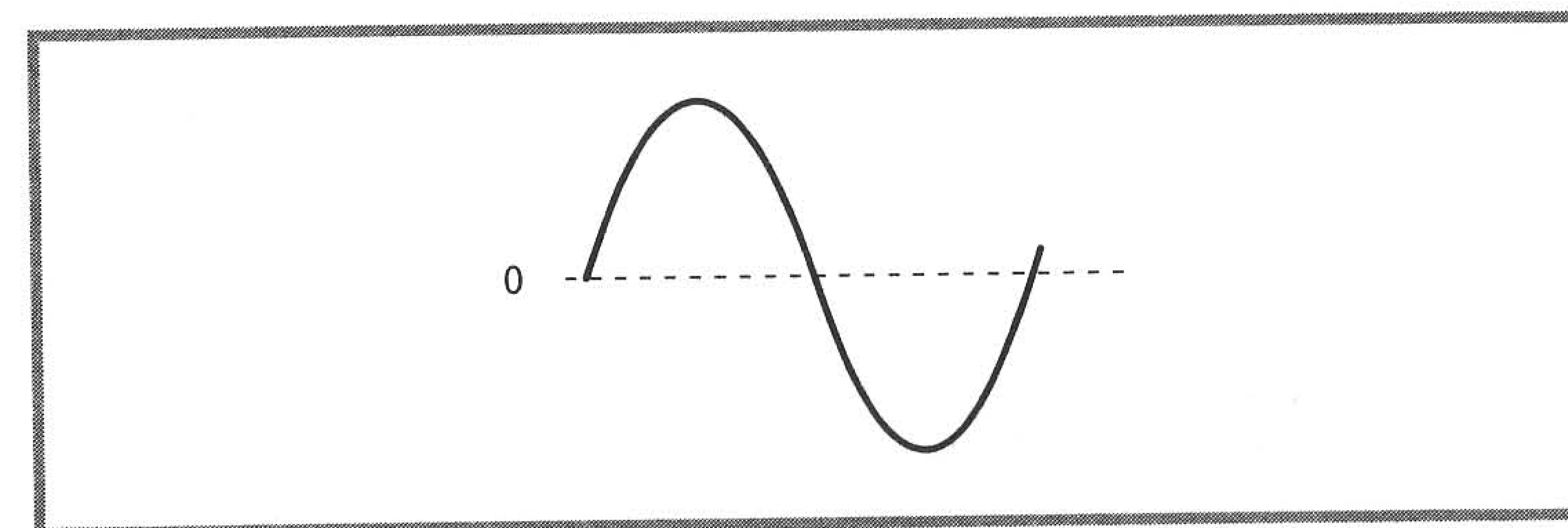


Figure 9.4 – Signal de forme correcte après réglage du potentiomètre P.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

9.3 Limites d'utilisation

Charge

Du fait de la limitation de courant de l'amplificateur opérationnel, la résistance de charge ne doit pas être trop faible. Le phénomène est le même que celui qui a été observé pour l'amplificateur de tension du chapitre 3. Pour l'observer expérimentalement, il suffit de connecter en sortie de l'oscillateur des résistances de charge de valeurs de plus en plus faibles et de rechercher la limite de bon fonctionnement. Si l'on

veut utiliser cet oscillateur avec une charge qui demande un courant important, on fera suivre le montage par un amplificateur de puissance à transistors comme celui qui a été étudié au chapitre 4.

Fréquence maximale

La fréquence d'oscillation dépend du choix de R et C, mais il est impossible de dépasser certaines limites à cause du manque de rapidité de l'amplificateur opérationnel. Le paramètre qui influe sur la limite de fréquence est la vitesse maximale de variation de la tension de sortie (*slew rate*). La faible valeur de cette pente maximale pour les amplificateurs opérationnels courants restreint leur usage à des fréquences qui ne dépassent pas quelques dizaines de kilohertz. Pour obtenir des valeurs plus élevées, on fera appel à d'autres composants.

Distorsion

La distorsion de la tension de sortie (c'est-à-dire la déformation par rapport à une sinusoïde idéale) est un paramètre essentiel pour chiffrer la qualité d'un oscillateur. Pour le montage étudié, on constate à l'œil nu un léger défaut de la tension de sortie. Cette imperfection n'est pas due à la structure de l'oscillateur (le pont de Wien donne en principe une bonne qualité de signal) mais aux diodes de limitation d'amplitude.

Pour pouvoir profiter des bonnes performances de l'oscillateur à pont de Wien, il faut perfectionner les circuits permettant de fixer l'amplitude de la tension de sortie. De nombreux montages existent, certains utilisant de simples dipôles non linéaires (lampe à incandescence, thermistance...), d'autres, plus élaborés, constituant une véritable boucle de régulation de l'amplitude.

INDEX

A

ajustable, 13
alimentation, 5, 8, 42, 75
  continue, 42, 75
ampèremètre, 29
amplificateur, 45, 107
  de puissance, 59-60
  opérationnel, 45, 48
amplification, 45, 48
amplitude, 40, 109

B

bande passante, 38
BNC, 36
brochage d'un transistor, 61

C

câblage, 3
calibre, 30
capacité, 16
carte d'acquisition, 35
circuit intégré, 27, 47
classe A, 62
classe B, 61
code des couleurs
  d'un condensateur, 18-19
  d'une résistance, 12-13
comparateur, 87
condensateur, 16, 19, 79
  céramique, 19
  chimique, 20
  de filtrage, 84
  plastique, 20
  tantale, 20
contre-réaction, 65
couplage
  alternatif, 37
  continu, 37
courant, 53, 65, 90, 102

D

décibel, 68
déphasage, 41, 69
DIL, 45, 97
diode, 22, 83, 109
  électroluminescente, 104
  Zener, 24, 55

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

dissipation, 61
distorsion, 112
  de croisement, 63
diviseur de tension, 94

E

écrêtage, 51
effet Joule, 9
enroulement
  primaire, 21
  secondaire, 21

F

farad, 16
filtrage, 67, 79
filtre, 67, 107
  actif, 74
  passe-bas, 68
fréquence, 41, 53, 68, 92, 100, 102, 110, 112
  d'échantillonnage, 38
  de coupure, 68
fusible, 75, 85

G

gain, 26
générateur, 43
  de signaux carrés, 97

I

impédance, 17, 68
instabilité, 107
intensité, 32

L

liaisons de masse, 8
loi d'Ohm, 9

M

marquage
  d'un condensateur, 18-19
  d'une résistance, 11, 14
masse, 5, 47
mesure, 32-33
multimètre, 29

N

niveau de synchronisation, 37
nombre de points, 30
non-linéarité, 108

O

ohm, 9
ohmmètre, 29
ondulation, 84
oscillateur
  à pont de Wien, 107
  sinusoïdal, 107
oscilloscope, 38
  analogique, 33
  numérique, 34

P

parallèle, 14
polarisation
  d'un transistor, 26
  d'une diode, 23
pont
  de Graetz, 77
  diviseur, 14
potentiomètre, 13, 111
précision, 30
puissance, 10, 12, 59
  apparente, 21, 83

R

radiateur, 59
rapport cyclique, 100, 103
redressement, 77
redresseur, 77
régulateur, 80
régulation, 79
résistance, 9, 11
  de charge, 111
  mesure d'une ~, 33
  variable, 13

S

saturation, 52
schémas, 5
série, 13
signal carré, 94, 97
sinusoïdal, 70
sonde, 36
  atténuatrice, 36
  différentielle, 36
source de tension, 55
spectre, 71
suiveur, 73
symboles, 5-7
synchronisation, 37

T

temporisateur, 97
tension, 19, 64
  alternative, 40
  continue, 39
  de saturation, 51
  mesure d'une ~, 32
terre, 5
transformateur, 20, 76
transistor, 25, 59

V

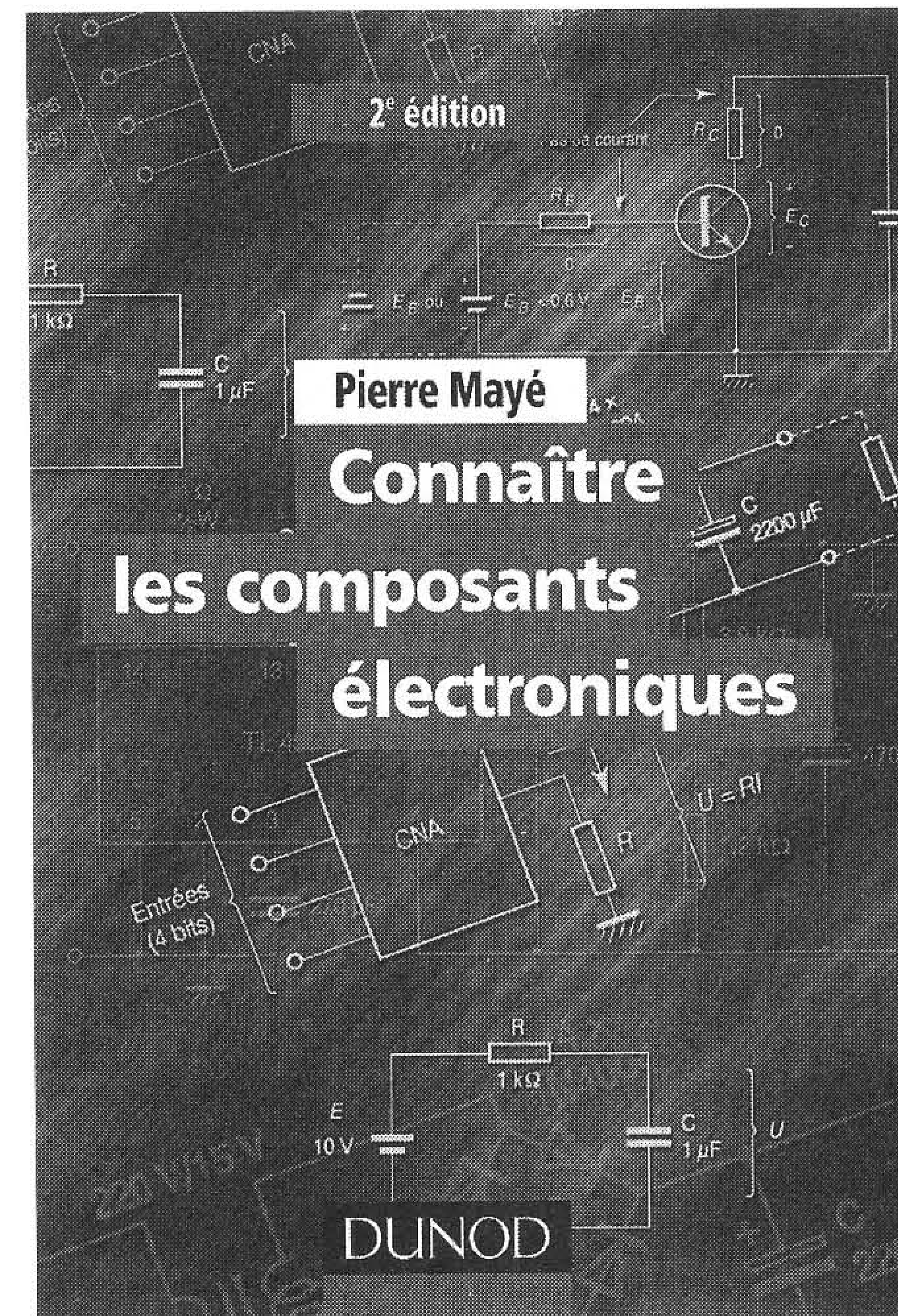
valeur efficace, 29, 40
valeurs normalisées, 10, 17

W

watt, 10

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

Collection EEA



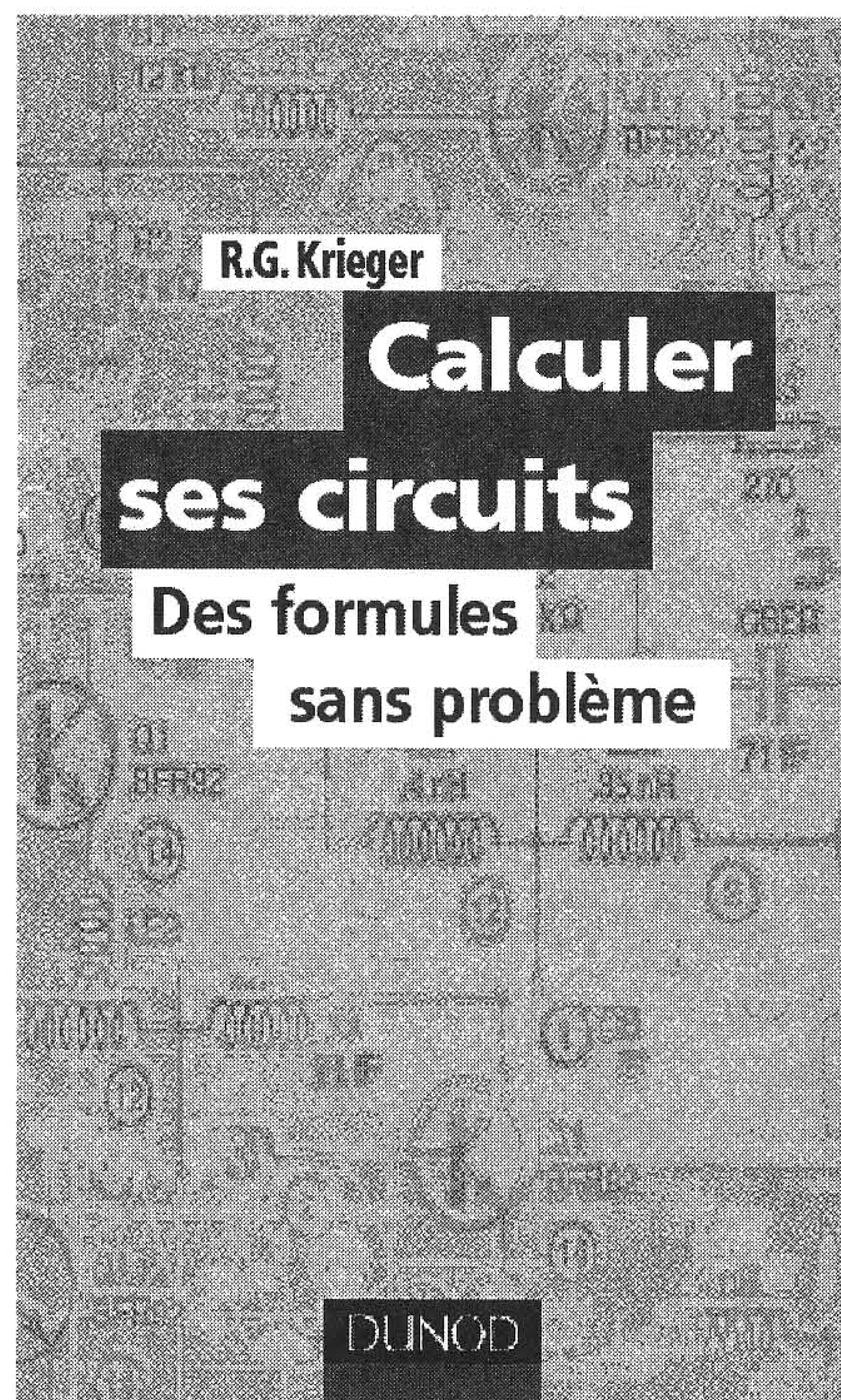
- Résistances et potentiomètres
- Condensateurs
- Bobines et transformateurs
- Diodes
- Transistors
- Circuits intégrés analogiques
- Circuits intégrés logiques
- Documentation
  sur les composants

Code 045224
168 pages • 98F



EN VENTE CHEZ VOTRE LIBRAIRE HABITUEL

Collection EEA



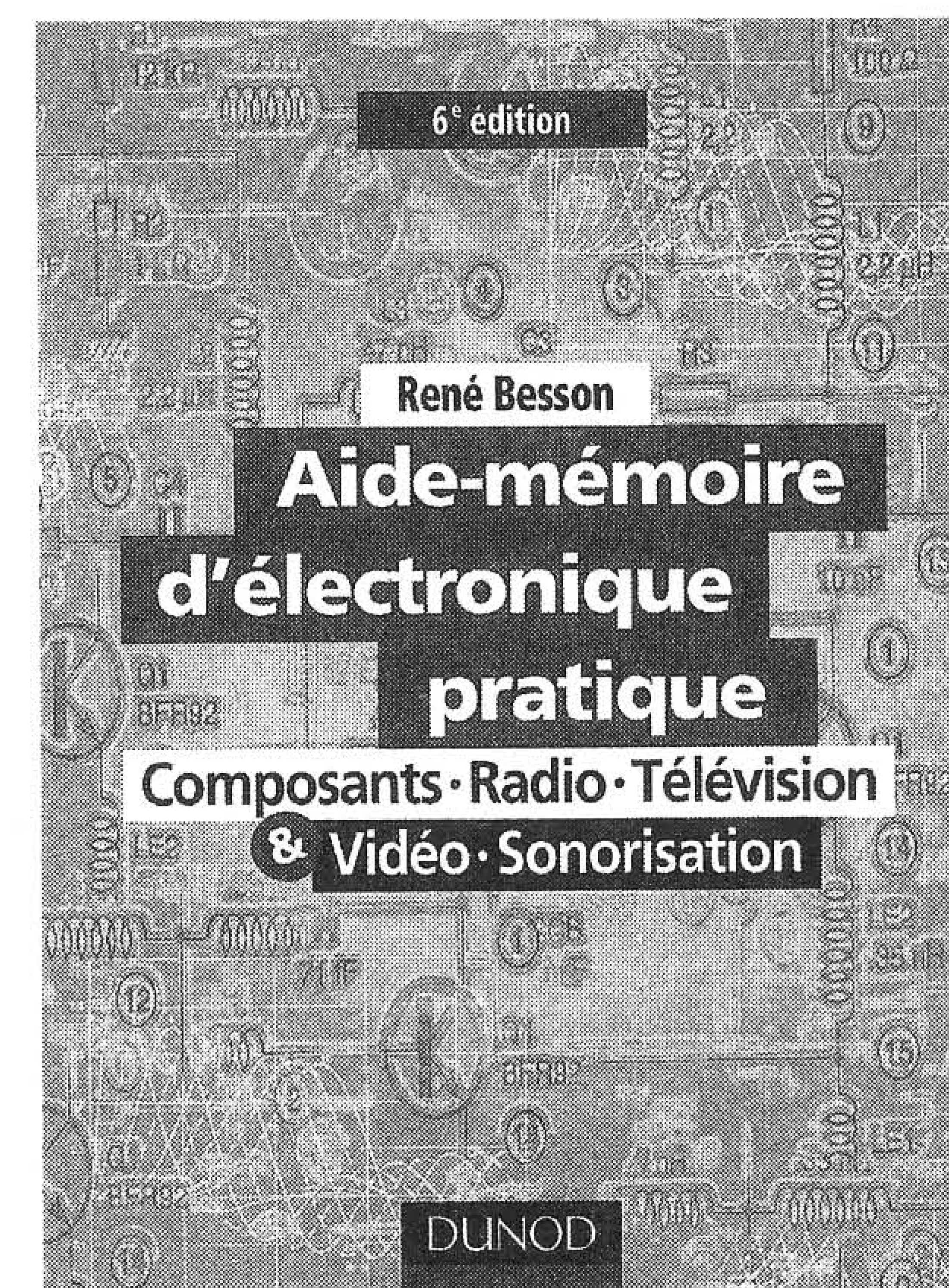
- Les formules des circuits à courant continu
- Les formules des circuits à courant alternatif
- Les formules des circuits électroniques
- Les formules des circuits de radiocommunication

Code 045159
224 pages • 99 F

EN VENTE CHEZ VOTRE LIBRAIRE HABITUEL



Collection EEA



- Normes et unités
- Électricité
- Résistances
- Condensateurs
- Self-induction
- Piezo-électricité
- Semi-conducteurs
- Diodes à semi-conducteurs
- Transistors
- Circuits intégrés
- Opto-électronique
- Éléments non-linéaires
- Accumulateurs et piles
- Radio électricité
- Télévision
- Télévision : tubes cathodiques
- Télévision : récepteur
- Télévision : antennes
- Satellites de télévision
- Télévision numérique par satellite
- Audio et Vidéo " grand public "
- Acoustique
- Sonorisation
- Haute fidélité – Home cinéma

Code 043882
360 pages • 128 F

EN VENTE CHEZ VOTRE LIBRAIRE HABITUEL



N° Editeur : 045274-(I)-(2.5)-OSB-100-ALL
Dépôt légal : octobre 2000
Imprimé en France par I.M.E
N° imprimeur : 14445